

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Měření přesnosti obráběcího stroje DMU 50 pomocí Ballbar systému

Measurement Precision Machine Tool DMU 50 by Using Ballbar System

Student:

Bc. Marián Meca

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marián Meca**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Měření přesnosti obráběcího stroje DMU 50 pomocí Ballbar systému**
Measurement Precision Machine Tool DMU 50 by Using Ballbar System
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor problematiky.
3. Zpracování naměřených hodnot.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

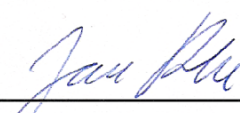
- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno. 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
[2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
[4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5. 2017

..... Meca Marián

podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků diplomové práce

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. 5. 2017

..... Meca Marián
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marián Meca

Adresa trvalého pobytu autora práce: Pekařská 3125, 738 01 Frýdek-Místek

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MECA, M. *Měření přesnosti obráběcího stroje DMU 50 pomocí Ballbar systému : diplomová práce*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 62 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Tato diplomová práce se zabývá měřením a vyhodnocením přesnosti obráběcího stroje DMU 50, a to pomocí Ballbar systému. V této práci je proveden teoretický rozbor vývojové generace NC strojů, přesnosti obrábění i obráběcích strojů, a rozbor běžných metod kontrol CNC strojů. Dále je podrobně popsána analýza soustavy měření, a to včetně ukázek výpočtů. Hlavní přínos této diplomové práce je vyhodnocení výsledků měřených hodnot odchylek od ideální kružnice. Veškeré záznamy z měření jsou uvedeny v elektronické příloze.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MECA, M. *Measurement Precision Machine Tool DMU 50 by Using Ballbar System : Master Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 62 p. Thesis head: Kratochvíl, J.

This master thesis deals with measurement and evaluation of the precision machine tool DMU 50 by using Ballbar system. In this thesis, the theoretical analysis of the development of a generation NC machines, precision of machining and machine tools and analysis of common CNC machine control methods is performed. The realized analysis of the measurement system is described in detail, including examples of computations. The main contribution of this master thesis is the evaluation of results of measured values of deviations from an ideal circle. All measurement records are listed in an electronic annex.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	- 7 -
1. Úvod	- 9 -
2. Teoretický rozbor problematiky	- 10 -
2.1. Historie	- 10 -
2.1.1. Historie kontroly přesnosti obráběcího stroje.....	- 10 -
2.1.2. Historie NC strojů.....	- 11 -
2.2. Vývojové generace NC strojů	- 11 -
2.3. Přesnost obrábění	- 13 -
2.4. Přesnost obráběcích strojů.....	- 15 -
2.4.1. Pracovní přesnost.....	- 15 -
2.4.2. Geometrická přesnost	- 16 -
2.5. Běžně používané metody kontrol CNC strojů	- 18 -
2.5.1. Porovnání zmíněných metod kontrol.....	- 21 -
3. Analýza soustavy měření.....	- 22 -
3.1. Použitá metoda Renishaw Ballbar QC20-W	- 22 -
3.2. Popis měřeného stroje	- 25 -
3.3. Postup měření na stroji.....	- 27 -
3.4. Nejistoty měření	- 28 -
3.4.1. Ukázka výpočtu výběrového průměru a nejistoty měření	- 29 -
3.5. Hrubé chyby	- 32 -
3.5.1. Ukázka výpočtu testu odlehlosti.....	- 34 -
4. Vyhodnocení experimentu	- 37 -
4.1. Měření v rovině XY po 360° dráze	- 39 -
4.2. Měření v rovině YZ po 220° dráze	- 43 -
4.3. Měření v rovině ZX po 220° dráze	- 47 -
5. Závěr a doporučení.....	- 52 -
6. Seznam použité literatury	- 54 -
7. Seznam použitých obrázků	- 56 -
8. Seznam použitých tabulek.....	- 56 -
9. Přílohy	- 57 -

Seznam použitých symbolů a značek

ANSI	[-]	Americký národní standardizační institut (American National Standards Institute)
ASME	[-]	Americká společnost strojních inženýrů (American Society of Mechanical Engineers)
CCW	[μm]	Kruhovitost proti směru hodinových ručiček
CNC	[-]	počítačově číslicové řízení (Computer Numerical Control)
ČSN	[-]	Česká technická norma
CW	[μm]	Kruhovitost ve směru hodinových ručiček
G	[μm]	Kruhovitost
G(b)	[μm]	Obousměrná odchylka kruhovitosti
H	[-]	Tabulková mezní hodnota pro stanovenou pravděpodobnost a rozsah výběru
H_i	[-]	Normovaná hodnota pro posouzení odlehlosti extrémních hodnot daného souboru naměřených hodnot (pro $x_i < \bar{x}$)
H_k	[-]	Normovaná hodnota pro posouzení odlehlosti extrémních hodnot daného souboru naměřených hodnot (pro $x_i > \bar{x}$)
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
M_m	[mm]	jmenovitý rozměr
M_{si}	[mm]	skutečný rozměr v i-tém bodě skutečné plochy
NC	[-]	číslicové řízení (Numerical Control)
P	[%]	Pravděpodobnost
R_{\max}	[μm]	Drsnost povrchu (všeobecné označení)
USB	[-]	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
X	[μm ; $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$]	Vyjádření výsledku měřené veličiny X

k_s	[-]	Koeficient rozšíření
n	[-]	Počet měření (respektive rozsah výběru)
$s(\bar{x})$	$[\mu\text{m}; \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$	Směrodatná odchylka
u_A	$[\mu\text{m}; \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$	Standardní nejistota typu A
u_{As}	$[\mu\text{m}; \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$	Rozšířená nejistota typu A
\bar{x}	$[\mu\text{m}; \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$	Výběrový průměr naměřené veličiny
x_i	$[\mu\text{m}; \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$	Jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x
Δ_p	[mm]	Odchylka polohy (všeobecné označení)
Δ_r	[mm]	Odchylka rozměru (všeobecné označení)
Δ_t	[mm]	Odchylka tvaru (všeobecné označení)

1. Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na kvalitu výrobků. Aby byl výrobek vyroben ve stanovené kvalitě, tak musí být vyráběn na takovém stroji, který právě dokáže vyrobit výrobek v požadované kvalitě. Mnoho výrobků je vyráběno procesem obrábění, kde se ve velké míře využívá CNC obráběcích strojů. Nicméně každý obráběcí stroj stárne a opotřebovává se. Proto k zachování požadovaných vlastností obráběcího stroje a k zajištění jeho bezproblémového chodu, jsou kladeny velké požadavky i na jeho údržbu a kontrolu. U údržby je důležité dodržovat její pravidelnost a provedení příslušných úkonů předepsaných výrobcem stroje. Pro kontrolu CNC obráběcích strojů se velmi často využívají různé diagnostické systémy a zařízení, které slouží k zjišťování závad a chyb na stroji. V současnosti existuje celá řada různých provedení těchto systémů. Pomocí těchto systémů lze svým způsobem určit stav jednotlivých celků dotyčného stroje, a stanovit tak rozsáhlejší postup při provádění údržbových prací. Zjištěné závady i chyby není dobré zanedbávat, neboť jejich zanedbáním mohou vzniknout ještě závažnější a mnohem rozsáhlejší závady či chyby. Oprava těchto chyb a závad má své důvody. Jedním z důvodů je, že mohou mít za vinu nechtěnou výrobu zmetkových výrobků, které právě značně zvyšují náklady, a tak i samotnou finanční stránku výroby.

Tato diplomová práce se zabývá měřením a vyhodnocením přesnosti obráběcího stroje DMU 50, a to pomocí systému Renishaw Ballbar QC20-W. Tento systém se používá k měření změn poloměru, a to během otáčení Ballbaru kolem pevného bodu. Tyto údaje se následně použijí k výpočtu celkových naměřených hodnot přesnosti obrábění (kruhovitost, odchylky kruhovitosti atd.) na CNC obráběcích strojích, a to v souladu s mezinárodními normami, jako je například ISO 230-4 a jiné. Zmíněný systém Ballbar je v této práci podrobně rozepsán. Dále je v práci proveden teoretický rozbor přesnosti obrábění i obráběcích strojů, běžné metody kontrol CNC strojů, analýza soustavy uskutečněného měření, včetně ukázek výpočtů, a vyhodnocení experimentu dle Ballbar diagnostiky. Podklady pro vypracování této diplomové práce byly získány z odborné literatury, experimentálního měření, a také z informací dosažených z dosavadního studia.

2. Teoretický rozbor problematiky

2.1. Historie

2.1.1. Historie kontroly přesnosti obráběcího stroje

Už v někdejších dobách bylo nutno ověřovat přesnosti obráběcích strojů jak u nově vyrobených, kde konečná kontrola přesnosti stroje je součástí dílčích kontrol výrobních, tak i u strojů pracujících v provozu. Přesnost práce obráběcího stroje je kontrolována automaticky, a to tak, že se kontroluje rozměrová přesnost obrobených součástí. Nepřesně obrobené součásti jsou dány nepřesným strojem. Kontrola přesnosti obráběcího stroje už zpočátku vycházela z požadavku, který je na stroj kladen. Byl to především požadavek geometrické přesnosti součástí obrobených na stroji, tj. kruhovitost, válcovitost rovinnost apod. [1]

První, kdo se zabýval problematikou měření přesnosti obráběcích strojů, byl pan profesor G. Schlesinger, který již v roce 1927 vydal publikaci, ve které shrnul dosavadní zkušenosti s vlastním proměřováním obráběcích strojů, a tímto tak dal základ k vytvoření přejímacích podmínek obsahujících příslušné tolerance, které výrobce zaručoval kupujícímu. V této zmíněné publikaci, a také z později vydaných, Schlesinger uváděl výlučně tolerance týkající se geometrické přesnosti strojů. Z důvodu, že výrobci obráběcích strojů neměli žádnou směrnici, která by byla měřítkem pro záruku výrobce a pro požadavky zákazníků, se tak rozšířily jeho publikace téměř ve všech průmyslových státech. Druhou významnou osobností, která se zabývala touto problematikou, byl pan Ing. Salmon, který ve Francii vytvořil směrnice pro kontrolu přesnosti obráběcích strojů, podle nichž se přesnost stroje posuzuje nikoliv podle jeho geometrické přesnosti, nýbrž podle geometrické přesnosti obrobených součástí. Ze současného hlediska jsou směrnice a předpisy výše uvedených pánů nepřijatelné, nicméně jim nelze upřít významnou zásluhu na zdokonalení a zvýšení přesnosti světové strojírenské výroby. [1]

2.1.2. Historie NC strojů

V padesátých letech dvacátého století byly v USA a Japonsku vyvinuty první číslicově řízené stroje. Jednalo se o klasické stroje, které obsahovaly jednoduchý řídicí systém s elektronkovými obvody. Programy byly ukládány na mechanické paměti, a to v podobě šablon, mechanických zarážek nebo váček, které byly následně vystřídány děrnými páskami a optickými snímači. Své použití v této formě nacházely nejčastěji při komplikovaných součástech ve velkých sériích jako vrtačky a vyvrtávací stroje, u nichž byl zcela umožněn automatický proces výroby, který probíhal samostatně a bez jakéhokoliv zásahu obsluhy. Práce obsluhy se tak omezila pouze na vkládání a vyjímání polotovaru. [2; 3]

Ubíhajícím časem byly projeveny limity NC strojů, a to kvůli jejich pevně propojeným elektronickým prvkům. Z tohoto důvodu začaly NC stroje být obohacovány počítačem a právě tady se začala psát historie CNC strojů. Tento způsob představoval revoluční novinku, díky které bylo možné lépe programovat a také programy průběžně upravovat během zkoušení. Pomocí počítačů tedy došlo k dobrému uchovávání dat k pozdějšímu využití i změnám, a především bylo dosaženo zjednodušení a urychlení samotného procesu programování a řízení strojů. Výroba se tak neprodleně stala značně kvalitnější, výkonnější, a bylo v ní dosaženo nižších počtů zmetkových kusů výrobků, což mělo také za následek snížení cen vynaložených na výrobu. Proto jsou v dnešní době CNC stroje nedílnou součástí téměř všech pracovišť zaměřených na strojírenskou výrobu. [2]

2.2. Vývojové generace NC strojů

Podle stupně vývoje lze rozdělit číslicové stroje na následující [3; 4]:

1) Stroje první vývojové generace – Jedná se o NC stroje, které byly dedukovány od běžných konvenčních strojů a přizpůsobeny pro NC řídicí systémy. Stroje byly poupraveny, aby k nim mohly být přiděleny číslicové řídicí systémy. Z důvodu nedostatků charakteristických znaků pro konstrukci NC obráběcích strojů začaly časem tyto typy strojů být nevyhovující.

2) Stroje druhé vývojové generace – Stroje druhé generace byly konstruovány přímo pro číslicové řízení. Nechyběla zde výbava systému automatické výměny nástrojů, kdy výměna opotřebovaných nástrojů v zásobníku je ruční. Některé z těchto strojů byly vybaveny dopravníkem třísek, toho bylo využito především u soustruhů. Pojednávalo se výhradně o stroje, které nesplňovaly podmínky pro zařazení do automatizovaných výrobních soustav.

3) Stroje třetí vývojové generace – Hlavním znakem této generace strojů je jejich přizpůsobení pro provoz v automatizovaných výrobních soustavách. Proto se tyto stroje charakterizují použitím systému automatické výměny obrobků. Zásobníky nástrojů mají větší kapacitu, nicméně výměna opotřebovaných nástrojů probíhá stále ručně. Výraznou novinkou těchto strojů je jejich stavebnicovost, což umožňuje slevit celkovou výrobu.

4) Stroje čtvrté vývojové generace – Tuhle vývojovou generaci lze prohlásit za zcela automatickou, neboť nejen výměna obrobků je automatizovaná, ale také už i výměna nástrojů je zautomatizovaná, dále je vyřešena manipulace s třískami a rovněž je vyřešena i návaznost na všechny druhy mezioperační dopravy. Jedná se tedy o plně automatizovaná technologická pracoviště s vysokým stupněm automatizace s možností pracovat ve třísměnném provozu.

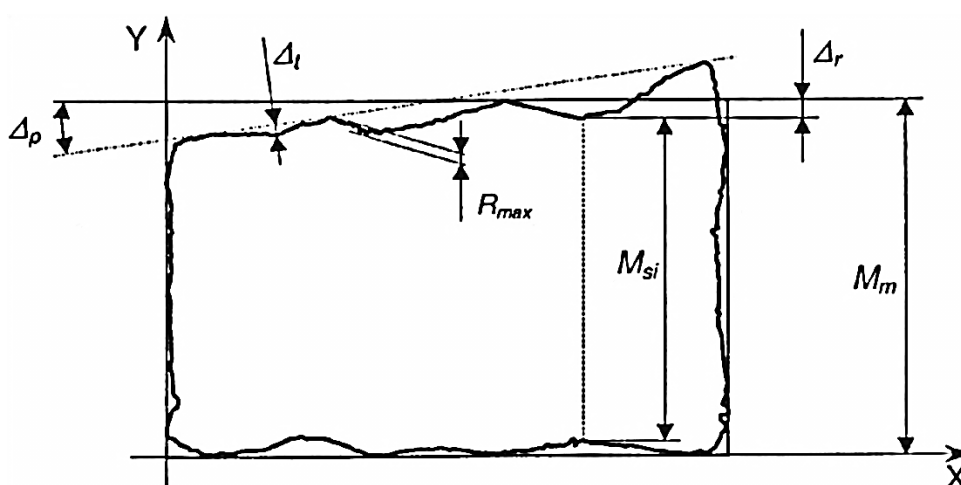
5) Stroje páté vývojové generace – Po rozsáhlém takřka uspokojujivém vyřešení úplné automatizace základních funkcí CNC obráběcích strojů v předešlých generacích se začaly v konstrukcích strojů páté generace uplatňovat mechatronické prvky. To znamenalo především elektronickou kompenzaci chyb polohování, měření rozměrů obrobků během obrábění měřicími sondami a korekce programu pro dodržení výkresových rozměrů i úchylek přesnosti. V neposlední řadě se objevilo použití laserového odměřování polohy a optimalizace řezných podmínek.

6) Stroje šesté vývojové generace – Stroje šesté generace mají konstrukci založenou na zkušenostech z předešlých vývojových generací. Hlavními charakteristickými znaky těchto strojů jsou snižování časů výměny nástrojů a obrobků na minimum, vysokorychlostní, víceosé a suché obrábění, dále dálková diagnostika hlavních skupin strojů, aplikace ultrapřesného obrábění (tj. obrábění na desetiny mikrometru), a také koncepce, která má co nejvíce vyhovět zákazníkovi.

2.3. Přesnost obrábění

Přesnost obrábění lze chápat jako stupeň shody skutečného rozměru s rozměrem stanoveným na výkresové dokumentaci součásti. Pro určité součásti jsou stanoveny požadované geometrické tvary a rozměry včetně tolerancí, drsnosti povrchů a jiné významné údaje. Čím blíže jsou skutečné hodnoty přiblíženy k těmto požadovaným údajům, tím je dosaženo větší přesnosti. Avšak ve skutečnosti při obrábění vznikají odchylky i nepřesnosti od předepsaných údajů. [5; 6]

Libovolná součástka plní správně svou funkci tehdy, když se její skutečné údaje tvaru a povrchu pohybují v přípustných mezích od údajů tvaru a povrchu ideální součástky, které byly zjištěny jako uspokojivé pro plnění požadované funkce. Stanovit a změřit nepřesnost každého bodu skutečného povrchu obrobene součástky je prakticky neuskutečnitelné. Proto byly zavedeny a specifikovány příslušné druhy odchylek skutečné povrchové plochy obrobku (obr. 1), jako je odchylka polohy, odchylka tvaru, odchylka rozměrů od jejich jmenovitých hodnot a drsnost povrchu. [5]



Obr. 1 – Druhy odchylek skutečné povrchové plochy obrobku [5]

Odchylka polohy Δ_p – Je stanovena nepřesností vzájemného vztahu dvou prvků (bodů, přímek, ploch), a to buď na jedné součástce, či na více součástkách navzájem. Velikost odchylky polohy závisí především na způsobu obrábění, pracovních podmínkách, přesnosti a tuhosti obráběcího stroje, a při vícero součástkách se projevuje i vliv montáže. [5]

Odchylka tvaru Δ_t – Tato odchylka je dána rozdílem tvaru skutečné plochy, a to vzhledem k ideálnímu tvaru dané součásti. K této odchylce tvaru se zahrnuje také vlnitost skutečné plochy, která je způsobena především kmitáním soustavy stroj-nástroj-obrobek. [5]

Odchylka rozměru Δ_r – Tvoří rozměrovou nepřesnost skutečné plochy vztažené k rozměru jmenovité plochy. Matematicky lze tento vztah vyjádřit jako rozdíl mezi skutečným rozměrem M_{si} a jmenovitým rozměrem M_m . Skutečný rozměr je rozměrem naměřeným na součástce a v každém bodě „i“ skutečné plochy je odlišný. V každém bodě skutečné plochy bude tedy velikost odchylky rozměru jiná. [5]

Drsnost povrchu R_{max} – Reprezentuje velmi malé nepravidelnosti povrchu v hodnotách mikrometru, které na obrobené součástce vznikají jako stopy po ostří nástroje, brusných zrn a podobně. Velikost a tvar nepravidelností povrchu jsou determinované způsobem obrábění, fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu, třením nástroje po obráběné ploše, tuhostí nástroje, jakostí i tvarem ostří, geometrií nástroje i řeznými podmínkami. [5]

Během výroby součástek není prakticky možné vytvořit součástky s absolutní přesností. Jednotlivé rozměry obrobené součástky se pokaždé liší od jmenovité hodnoty. Příslušná odchylka je závislá na mnoha činitelích, ze kterých nejvýznamnějších je použita výrobní operace. U některých dokončovacích operací se vzniklé odchylky přibližují k jmenovitému rozměru velmi blízko, tedy rozdíl mezi skutečným rozměrem a rozměrem předepsaným na výkresové dokumentaci je velmi nepatrný. [5]

Celková nepřesnost obrábění je dána celou řadou faktorů. Každý z těchto faktorů podporuje vznik charakteristických prvotních nepřesností, z nichž nejpodstatnější jsou [5]:

- nepřesnosti zapříčiněné opotřebením ostří řezného nástroje,
- nepřesnosti vyvolané pružnými deformacemi technologické soustavy stroj-nástroj-obrobek, a také od řezných sil i odporů,
- nepřesnosti zapříčiněné teplotními deformacemi technologické soustavy,
- nepřesnosti řazení stroje a ustavení obrobku na stroji,
- nepřesnosti vyvolané deformacemi obrobku způsobených od upínacích sil,

- nepřesnosti podnícené geometrickými a kinematickými nepřesnostmi určitého obráběcího stroje,
- nepřesnosti způsobené vnitřním napětím nacházejícím se v materiálu obrobku,
- nepřesnosti vyvolané geometrickými nepřesnostmi řezného nástroje,
- nepřesnosti zapříčiněné otřesy a chvěním při obrábění,
- nepřesnosti přivozené kolísáním vstupních rozměrových parametrů obrobku včetně jeho nehomogenního materiálu.

Z výše uvedených bodů základních faktorů ovlivňujících přesnost obrábění vyplývá, že prvořadou roli při zabezpečení přesnosti výroby má obráběcí stroj a jeho přesnost. [5]

2.4. Přesnost obráběcích strojů

Než je nový stroj zařazen do provozu, musí se vykonat jeho křížová cesta od výrobce, tj. balení, nakládání, doprava, skládání a místní doprava na pracoviště. Tyto všechny úkony mohou a v mnoha případech také ohrožují přesnost stroje. Proto je nutné vykonat přímo na pracovišti znovu všechny kontrolní operace jako u výrobce, a provádět pravidelné kontroly. Přičemž tyto kontroly se vykonávají podle předepsaných norem, nebo postupů. [1; 3]

2.4.1. Pracovní přesnost

Pracovní přesnost obráběcích strojů je zvláště ovlivňována [8; 7]:

- kvalitou zpracování jejich funkčních částí a pečlivostí uskutečnění dílčí a celkové montáže,
- tuhostí celků, včetně rozhodujících prvků, kterými jsou pracovní vřetena, ložiska i vodící dráhy,
- přesností nastavení nástrojů vzhledem k obroku,
- tepelnými deformacemi.

Pracovní přesnost během obrábění značně ovlivňuje ještě celá škála dalších faktorů, hlavně však nástroj, obráběná součást a strategie obrábění. Veškeré tyto uvedené vlivy jsou obvykle mimo dosah konstrukce obráběcích strojů. [8; 7]

Obráběcí stroj se během nasazování do výrobního procesu podrobuje přijímacím zkouškám geometrické a pracovní přesnosti, a to podle stanovených norem řady ISO 9000 a podobně. Pomocí zkoušek geometrické přesnosti lze ověřit přesnost montáže stroje i včetně jeho celkového seřízení. Tyto zkoušky jsou náležitě kombinovány tak, aby se dle naměřených výsledků daly stanovit příčiny nedostatků ve zpracování významných částí obráběcího stroje. Také zkoušky pracovní přesnosti mohou dodatečně odhalit nedokonalosti ve zpracování obráběcího stroje, především pokud jde o vymezení vůli a vhodnosti funkce ovládacích prvků za pracovních podmínek. Kromě nepřesnosti ve zpracování obráběcího stroje má vliv na jeho pracovní přesnost také kinematická nepřesnost, která začíná už z úchylek v kinematické vazbě převodů mezi individuálními pohyby, kde při jejich složení se vytváří výsledný pracovní pohyb. [8; 7]

Pracovní přesnost obráběcího stroje je také ovlivňována tuhostí dané soustavy. Působením řezných sil se deformují různé části obráběcího stroje (obrobku, ale i také nástroje), jehož efektem je změna nastavení vzájemné polohy ostří nástroje vůči obrobku (změna v hloubce řezu), a tímto porušení přesnosti potřebných rozměrů a tvarů obrobené plochy. Výsledná tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek je v zásadě proměnlivou veličinou v závislosti na poloze nástroje vůči obráběcímu stroji respektive obrobku. [8]

2.4.2. Geometrická přesnost

Geometrická přesnost obráběcího stroje je určena přesností tvaru a polohy jednotlivých strojových částí a jejich vzájemnými pohyby. Je důležitým, ale není postačujícím předpokladem pro zabezpečení požadované přesnosti práce obráběcího stroje. Závisí od ní přesnost tvaru relativní dráhy nástroje a obrobku, a tedy v konečném důsledku i přesnost tvaru i relativní polohy ploch obrobku obrobeného na daném stroji. [5]

Geometrická přesnost strojů, včetně její měření, je specifikována normami řady ČSN ISO 230, přičemž je zde připouštěno možnosti využití i jiných metod, které v ní nejsou obsaženy, a to pokud přinášejí srovnatelné nebo lepší získané informace o stroji. Pro zkoušky geometrické přesnosti obráběcího stroje se vykonává měření těchto základních veličin charakterizujících přesnost tvaru, polohy a vzájemných pohybů. Pro měření geometrické přesnosti se tedy především kontroluje: přímost, rovnoběžnost,

kolmost, rovinnost, souosost, čelní házení, obvodové házení, osová vůle a osový pohyb. Geometrická přesnost se na strojích měří buď při klidu, nebo za takzvaného volného chodu naprázdno. [1; 3; 5]

Geometrická přesnost se zjišťuje v tepelně stabilním stavu stroje, který se shoduje s jeho tepelným stavem při normálních pracovních podmínkách. Vhodná teplota okolí během měření je $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nestabilita teploty pracovního prostředí při zkouškách nemůže překročit hodnoty uvedené v návodu pro obsluhu stroje, či v příslušných normách pro přesnost určitého typu a druhu obráběcího stroje. Když tyto hodnoty nejsou specifikovány, pak nestabilita teploty pracovního prostředí nemůže překročit pro stroje třídy přesnosti III., IV. a V. $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro stroje třídy přesnosti I. a II. tato hodnota není definována. Během zkoušek musí být stroj chráněn před prouděním vzduchu, tepelným zářením a jinými zdroji tepla. [5]

Zkoušky geometrické přesnosti začínají pokaždé důkladným uložením stroje na základ tak, aby jeho referenční (výchozí) plocha byla ve vodorovné rovině. Tento čin je obvykle nazýván jako uvedení stroje do vodováhy. K této referenční ploše jsou poté porovnány polohy dalších funkčních ploch, os vřeten, směry pohybů pracovních jednotek obráběcího stroje a podobně. Výchozí plochy obvykle bývají vodící plochy na lůžkách frézek, soustruhů, brusek, hoblovek a jiných strojů. Obráběcí stroj se do vodorovné roviny nastavuje většinou prostřednictvím nastavovacích klínů a šroubů. Poloha se poté kontroluje vodováhou, kterou je eventuálně možné proměřit také přímost i rovinnost výchozí plochy. Přípustné odchylky od vodorovnosti jsou přijatelné v setinách milimetrů na délku jednoho metru plochy, přičemž jsou uvedeny v příslušných normách pro přesnost určitého obráběcího stroje, respektive v návodu pro jeho obsluhu. Pokud tyto hodnoty nejsou specifikovány, pak jsou přijatelné tolerance brány vždy k jednomu metru, a to maximálně o hodnotě 0,04 mm pro stroje I. a II. třídy, a maximálně 0,02 mm pro stroje vyšších tříd přesnosti. [5]

U strojů I. a II. třídy přesnosti nemohou chyby měření překročit 20 % hodnoty naměřené odchylky, u strojů III. a IV. třídy přesnosti to činí maximálně 25 %, a u strojů V. třídy přesnosti se může tato chyba měření rovnat maximálně 30 % hodnoty naměřené odchylky. Dále chyba, která vzniká při zpracovávání číselných údajů měření, nemůže překročit 10 % chyby měření. [5]

2.5. Běžně používané metody kontrol CNC strojů

Kontroly CNC obráběcích strojů lze provést různými metodami, avšak zpravidla se liší podle toho, na který konkrétní úsek stroje je potřeba se zaměřit. V následujícím textu jsou popsány ty nejběžněji používané metody kontrol CNC obráběcích strojů:

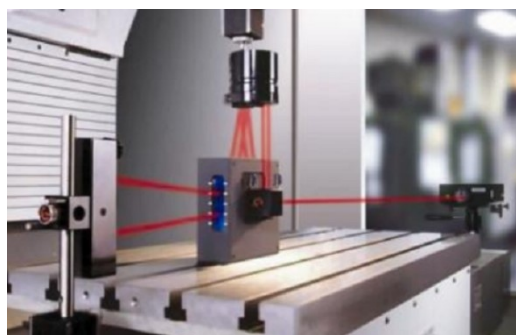
1. Preventivní kontrola (prohlídka) – Jedná se o pravidelné údržby každého stroje. Přičemž je zde zaměřováno na kontrolu jednotlivých funkčních celků stroje, jako jsou vedení a pohybové šrouby lineárních os, mazací i hydraulické systémy a podobně. Jsou vyčištěny všechny ventilátory i prostory pod kryty stroje. Kontrolují se také veškeré motory stroje, a to jak osově, tak i motory periferních zařízení. Kontroly a čištění jsou podrobeny také veškeré koncové spínače a snímače polohy. Běžně se provádí i výměna, nebo případně vyčištění, všech filtrů jednotlivých médií (olej, procesní emulze). Součástí této prohlídky bývá i zálohování strojních dat řídicího systému, a to pro případ ztráty dat některého ze strojů. V neposlední řadě mohou být při preventivní prohlídce odstraněny detekované poruchy drobného charakteru. [9]

2. Kontrola vřeteníků – Tato metoda kontroly se provádí především pomocí vibrodiagnostiky. Aplikací touto metodou lze zjistit skutečný stav ložisek uložení vřetena, stav mazání vřetena, a také celkovou mohutnost vibrací. Vibrační diagnostikou je možné proměření pohonu vřetena (motoru i převodovky). Tato metoda dokáže zachytit i počáteční poškození ložisek, a včasnou intervencí lze v takovémto případě předejít rozsáhlejší poruše stroje. U horizontálních a frézovacích center se může provést kontrola upínání nástrojů, která se provádí pomocí speciálního přístroje pro měření upínací síly. Výsledek je stanoven porovnáním naměřených hodnot vůči hodnotám udávaným výrobcem stroje. Stav kuželové dutiny vřetena lze kontrolovat pomocí kuželového kalibru na obtisk barvy. Může se tak předpovědět eventuální poškození kuželové dutiny, jako je například poškození bodovou korozí. [9]

3. Kontrola kruhové interpolace – Jako hlavní diagnostickou metodou pro kontrolu CNC obráběcích strojů je využíváno měření geometrické přesnosti a dynamických vlastností pohonů pomocí systému Renishaw Ballbar (v současnosti nejčastěji používané dostupné verze QC10 a QC20-W). Testy kruhové interpolace lze provádět v jedné rovině (ideální pro soustruhy), nebo také ve více rovinách (využití u obráběcích center). Měřicím

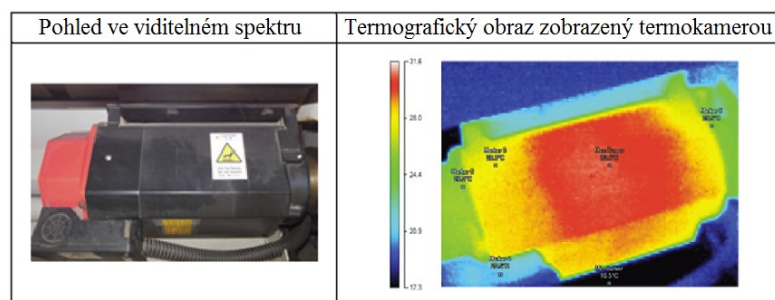
přístrojem jsou snímány odchylky naměřených dat od ideálního kruhu. Podle deformace výsledného grafu lze vyhodnotit vliv aktuálních chyb stroje na jeho přesnost. Tato kontrola umožňuje přesně určit, zdali jsou detekované chyby způsobeny mechanikou stroje, nevhodně nastavenou dynamikou pohonů, či chybami v nastavení odměřovacích systémů. Poté lze zhodnotit, které z objevených chyb mají nejzásadnější vliv na přesnost stroje, a navrhnout tak technické řešení pro odstranění patřičné závady. Hodnoty naměřených axiálních vůli lze prozatímne postupně vyřazovat zadáním kompenzace v řídicím systému. [9; 10; 11]

4. Kontrola a kalibrace odměřovacích systémů – Pro kalibrování odměřovacích systémů stroje se používají laserové interferometry v kombinaci s kompenzační jednotkou. Pro měření se využívají běžně dostupné laserové interferometry ML10 a Renishaw XL-80. Zvoleným laserovým interferometrem vždy v kombinaci s kompenzační jednotkou lze proměřit přesnost a opakovatelnost najetí polohy jednotlivých lineárních os. Po tomto naměření následuje určitá úprava nelineární kompenzace naměřených chyb (u nově kalibrovaných strojů vyrobení korekčních map v řídicím systému). Závěrem kalibrace je provedení kontrolního proměření zkompenzovaného stroje. Kalibrace odměřovacích systémů jsou doporučovány provádět i mimo opakující se v pravidelných termínech, a to právě v případech, kdy je na stroji měněno odměřování, dále když jsou měněny kuličkové šrouby, či upravována geometrie stroje jako je nové ustavení na základu. Obr. 2 znázorňuje, jak tato kalibrace odměřovacích systémů stroje laserovým interferometrem ve skutečnosti přibližně vypadá. [9; 12; 13]



Obr. 2 – Kalibrace odměřovacích systémů stroje laserovým interferometrem [9]

5. Kontrola pomocí termodiagnostiky – Tato metoda kontroly není příliš známá, a spíše se jedná o firemní tajemství některých společností. Jedná se především o návrh pro zlepšení současného systému údržby. Tahle metoda představuje velmi účinný nástroj pro kontrolu provozního stavu stroje, identifikaci přehřívání elektrických spojů a vodičů nebo také mechanických součástí. Měří se hlavně takové elektrické a mechanické prvky, které se dají pomocí termokamery diagnostikovat bez nutnosti odstávky a složitého sundávání krytů zařízení, což právě pozitivně ovlivňuje ekonomickou stránku výroby (to znamená, že lze měřit i během výrobního provozu stroje, a nejsou ovlivňovány průběhy zakázek). Měřené části představují zejména elektrické prvky umístěné ve skříni rozvaděče (jističe, motorové spouštěče apod.), elektrické pohony a čerpadla, při kterých se porucha nebo nerovnoměrné zatížení projevuje zvýšením teploty. Z hlediska vyhodnocování měření je klíčovým prvkem určení maximálních dovolených teplot jednotlivých částí. Při elektrických prvcích v skříňovém rozvaděči je doporučeno se řídit podle maximálních provozních teplot komponentů (integrované obvody, usměrňovací diody aj.) uvedených výrobcem. Ostatní elektroinstalační komponenty, jako jsou součásti desek plošných spojů (relé), usměrňovací diody, rezistory, mají běžně předepsanou maximální provozní teplotu, která se nesmí za běžného provozu překročit. Hodnotu této teploty je možné zjistit v katalogu elektrotechnických prvků, nebo z příslušných norem, kde např. pro křemíkové usměrňovače diody je tato teplota v rozsahu přibližně 100 až 140 °C. Podobně je určena i maximální provozní teplota elektromotorů. V případě mechanických částí, jako jsou řemenice s řemeny, revolverové hlavy vřetena aj., lze konstatovat, že situace je o něco jednodušší. A to z důvodu, že se obvykle jedná o relativně masivní nebo pohybující se komponenty, u kterých zvýšení teplot není výrazné. Obvykle se zvýšení teploty projeví v případě vniknutí nečistot, nebo při selhání mazání při pohybujících se prvcích, a to například v ložisku. Obr. 3 zobrazuje rozdíl mezi pohledem ve viditelném spektru a termografickým obrazem zobrazeným v termokameře. [14]



Obr. 3 – Ukázka pohledu ve viditelném spektru a v termografickém obraze [14]

2.5.1. Porovnání zmíněných metod kontrol

Všeobecné zjednodušené porovnání jednotlivých představených metod možných kontrol CNC strojů je zobrazeno v tab. 1.

Tab. 1 – Porovnání zmíněných metod kontrol CNC strojů [9; 10; 11; 12; 13; 14]

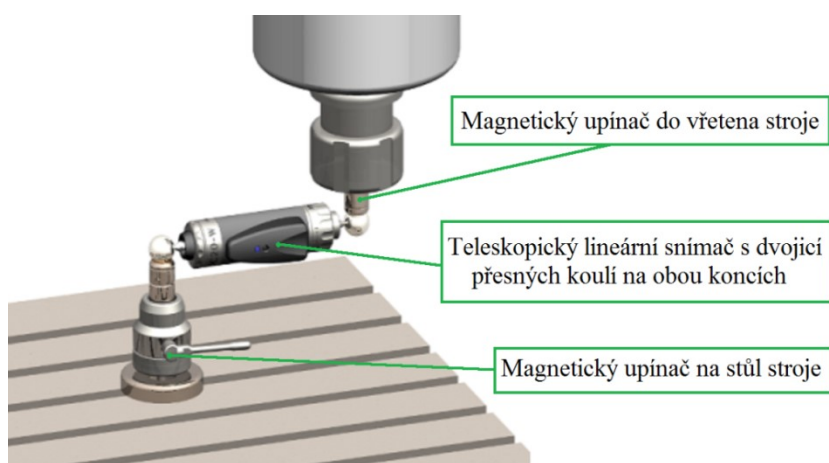
Metoda kontroly	Nutnost odstávky (vůči zakázkám)	Možnost zjištění poruchy částí stroje	Možnost softwarové kalibrace stroje	Specifikace všeobecného využití kontroly
Preventivní kontrola	Ano	Pouze vizuální části	Ne	Vizuální kontrola vedení, pohybových šroubů lineárních os, mazací a hydraulické systémy, dotahování svorek, čištění ventilátorů, filtrů a výměna olejů i kapalin, případně oprava drobných poruch
Kontrola vřeteníků	Ano	Ano	Ne	Pomocí vibrodiagnostiky je zjišťován stav ložisek, vřetena, pohonů vřeten, opotřebení převodů, poškození ložisek, mechanické uvolnění, nesouosost (spojek, ložisek i převodů), možné zadíráání, rezonance a deformace
Kontrola kruhové interpolace	Ano	Ano	Ano	Předvídá požadavky na údržbu a snižuje neplánované prostoje, lze srovnávat přesnost před i po havárii stroje s cílem určit nápravné požadavky, testují se osy a dynamické chyby servosystémů stroje, aplikace měření odchylek lineárního polohování, přímosti, úhlových natočení a kolmosti mezi osami, poskytnuta možnost kalibrace pětiosých strojů (dle ISO1071-6)
Kontrola odměřovacích systémů	Ano	Ano	Ano	Vysoká produktivita měření a kalibrace (pro krátké i dlouhé vzdálenosti - až 80 metrů), využití pro velmi přesné lineární a úhlové měření, měření rotačních os, měření rovinnosti i pravouhlosti a možnost dynamického měření
Kontrola pomocí termodiagnostiky	Ne	Ano	Ne	Lze identifikovat možné přehřívání různých součástí stroje, měří se především elektrické a mechanické prvky (jističe, motorové spouštěče, relé, elektrické pohony a čerpadla, diody, rezistory, motory, elektromotory, řemenice a řemeny, vřetena apod.), je možné včasné určit výměnu ložiska a podobných částí stroje

3. Analýza soustavy měření

3.1. Použitá metoda Renishaw Ballbar QC20-W

Pro experimentální část této diplomové práce byl zvolen systém Renishaw Ballbar QC20-W, který slouží pro kontroly a měření přesnosti obráběcích strojů. Proto je nutné uvést bližší informace týkající se tohoto zmíněného systému.

Systémy Renishaw Ballbar jsou poskytovány společností Renishaw, která je jednou z předních světových společností v oboru strojírenských a vědeckých technologií, a má nespočet zkušeností v oblastech řízení pohybu, spektroskopie, přesného obrábění měření, měření a zdravotnictví. Systémy Renishaw Ballbar dominují na trhu již téměř 20 let, a toto vedení pokračuje i dnes, a to pomocí bezdrátového systému Ballbar QC20-W. [10; 15; 16; 17]



Obr. 4 – Ustavení systému Renishaw Ballbar QC20-W na CNC stroji [10; 16; 18]

Samotný systém Renishaw Ballbar QC20-W se skládá ze dvou částí. První část je patřičný hardware, a druhá část je příslušný software. Tyto dvě nerozlučitelné části tvoří sestavu, která slouží k měření geometrických chyb u obráběcích CNC strojů a ke zjišťování nepřesností vyvolaných vlastním řídicím systémem anebo jednotkami servoregulace. Po ustavení jednotlivých dílů měřicího systému zobrazených na obr. 4 jsou během spuštění testu kuličky snímače vedeny v přesných magnetických miskách. Stroj při testování opíše kruhové oblouky nebo kruh, přičemž malé odchylky v poloměru tohoto pohybu jsou změřeny sondou a zachyceny softwarem. Pracuje-li stroj bez chyb, vyobrazí se vykreslená data jako dokonalý kruh. Jakékoliv chyby se projeví deformací kruhu,

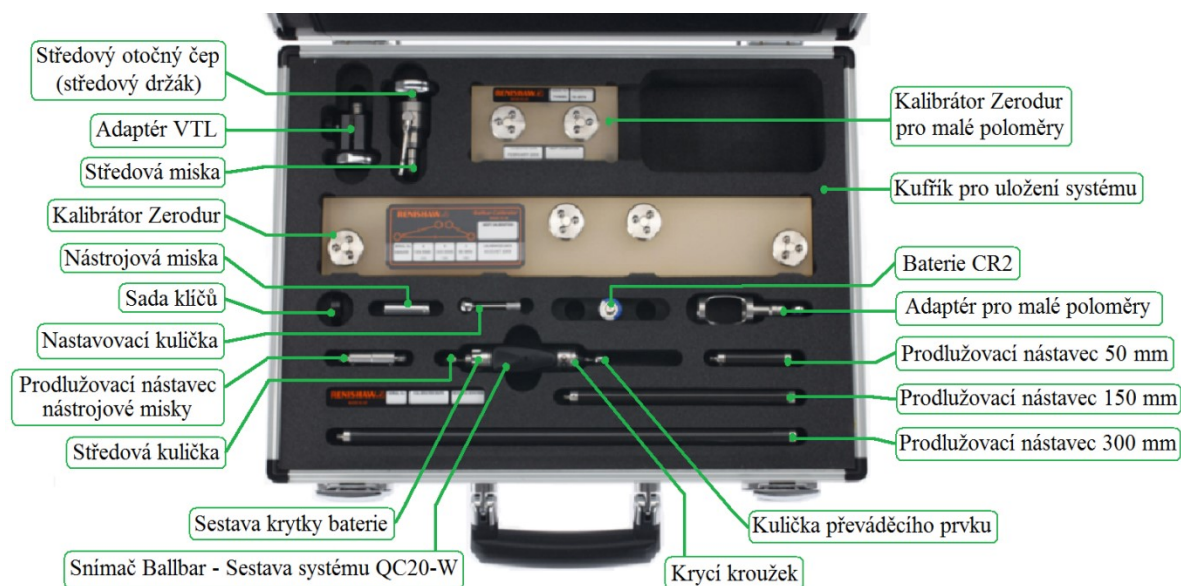
a to například zakřivením obvodu a někdy i více elipsovitým tvarem. Tyto patřičné odchylky od dokonalého kruhu naznačují nepřesnosti a problémy v číslicovém řízení, jednotkách servoregulace a v osách stroje. [10; 11; 16; 17; 18]

Během měření jsou nasnímané data odesílány pomocí bezdrátové technologie Bluetooth do softwaru v počítači, ve kterém software Renishaw Ballbar 20 vypočítá celkové hodnoty přesnosti (kruhovitost, odchylku kruhovitosti a další), a to v souladu s mezinárodními normami jako jsou např. ISO 230-4, ANSI/ASME B5.54 a další. Jednotlivé data jsou zobrazeny graficky, ale také v číselném formátu, jako pomůcka a podpora pro diagnostiku obráběcího stroje. [10; 11; 16; 17; 18]



Obr. 5 – Popis teleskopického lineárního snímače Ballbar [16; 18]

Obr. 5 zobrazuje popis teleskopického lineárního snímače Ballbar, který během měření zasílá nasnímané data pomocí bezdrátové technologie Bluetooth do softwaru v počítači. Tento převáděcí prvek je jedním z nejdůležitějších dílů systému Renishaw Ballbar. Stavová dioda slouží k informování uživatele o aktuálním provozním stavu. Svítí-li zeleně, systém je zapnutý, ale komunikace není navázána. Pokud svítí modře, tak komunikace je navázána, a když bliká modře, přenáší data. Režim úspory energie je představován pomalým blikáním zelené barvy. Pokud stavová dioda bliká pomalu žlutým zbarvením, tak upozorňuje, že baterie je málo nabitá, a v tomto stavu se nesmí snímat data, protože schopnost měření není optimální. Komunikační chyba snímání dat je zobrazována pod střídavým blikáním modré a červené barvy. Bliká-li dioda pouze červenou barvou, tak upozorňuje na výskyt závady. [10; 11; 16; 18]



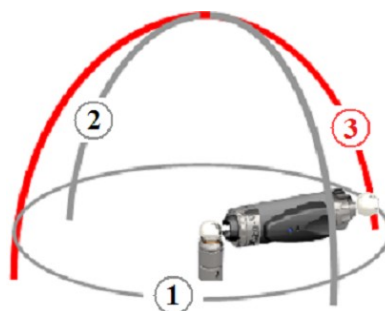
Obr. 6 – Souprava systému Renishaw Ballbar QC20-W v přenosném kufříku [16; 18]

Obr. 6 představuje popis běžné měřicí soupravy systému Renishaw Ballbar QC20-W, který je nabízen v přenosném kufříku. Součástí běžné měřicí soupravy je kalibrátor. Ten je vyroben z materiálu, který má velmi nízký, ba dokonce nulový, součinitel tepelné roztažnosti, a používá se pro kalibraci délky snímače. Technické parametry systému Renishaw Ballbar QC20-W jsou zobrazeny v tab. 2. [10; 16; 17; 18]

Tab. 2 – Technické parametry systému Renishaw Ballbar QC20-W [17]

Rozlišení snímače	0,1 μm
Přesnost snímače ballbaru (při 20 °C)	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Přesnost měření systému (při 20 °C)	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
Rozsah měření snímačem	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Max. rychlost snímání	1000 Hz
Přenos dat technologií Bluetooth	Třída 2 (zpravidla 10 m)
Pracovní dosah signálu	0 °C až 40 °C
Rozměry kufříku	395 x 300 x 105 mm
Hmotnost kufříku	3,75 kg (přibližně)

Systém Renishaw Ballbar QC20-W umožňuje volumetrickou diagnostiku. Je tedy umožněno kalibrovat stroj v rovinách XY, YZ a ZX, aniž by bylo nutné stroj nastavovat a opakovaně vystředovat mezi každým testem. Obr. 7 znázorňuje schéma pohybů volumetrického testu, kde číslo 1 představuje 360° test v rovině XY s 45° přejezdy, číslo 2 reprezentuje 220° test v rovině ZX s 2° přejezdy, a č. 3 tvoří 220° test v rovině YZ s 2° přejezdy. [10; 11; 16; 18]

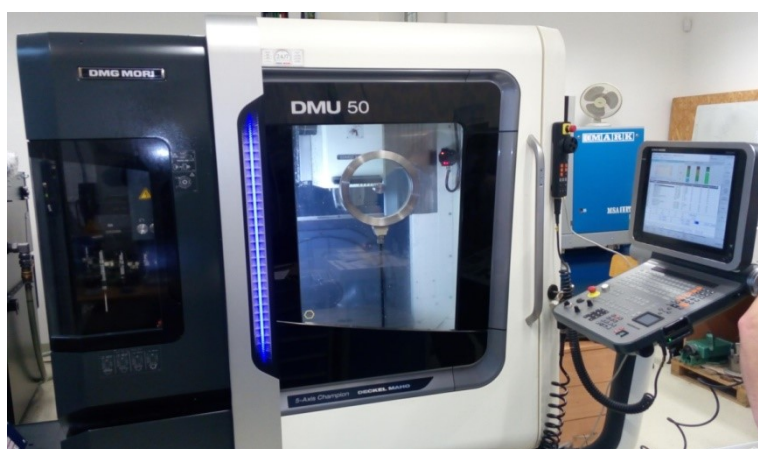


Obr. 7 – Schéma pohybů volumetrického testu [16; 18]

Pravidelným testováním stroje pomocí systému Renishaw Ballbar QC20-W lze dosáhnout zaručené přesnosti součástí vyráběných na CNC strojích, snížení prostojů, zmetkovitosti a nákladů na kontrolu strojů, zajištění souladu parametrů stroje s normami řízení jakosti, na základě zjištěných faktů provést včasnou a správnou údržbu. [10; 18]

3.2. Popis měřeného stroje

Měření bylo provedeno na CNC frézce DMU 50, která se nachází v areálu VŠB-TUO. Přičemž měření přesnosti této frézky bylo provedeno pomocí systému Renishaw Ballbar QC20-W. Tento CNC stroj je vyfocen na obr. 8 a jeho základní technické parametry jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 8 – CNC frézka DMU 50

Tab. 3 – Základní technické parametry CNC frézky DMU 50 [19]

		Popis	Hodnoty	Jednotky
Pracovní rozsah		Pojezd v ose X	500	mm
		Pojezd v ose Y	450	mm
		Pojezd v ose Z	400	mm
Hlavní pohon	Standard	Rozsah otáček	20 až 14000	min^{-1}
		Hnací síla	14,5 / 20,3	kW
		Točivý moment	121	N · m
	Volitelný	Rozsah otáček	20 až 18000	min^{-1}
		Hnací síla	25 / 35	kW
		Točivý moment	130	N · m
Posuv		Rychloposuv pro osy X / Y / Z	30	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
		Maximální přítlačná síla	4,8	kN
Pevný stůl		Upínací plocha	700 x 500	mm
		Maximální nosnost	500	kg
Propojený výkyvný otočný stůl		Upínací plocha	Ø 630 x 500	mm
		Maximální nosnost	200 / 300	kg
		Rozsah otáčení	-5 / +110	°
Přípojně hodnoty		Hmotnost	4480	kg
		Výkon	21	kW
		Maximální proud	31	A
Řízení	ERGoline® řízení s 19,5" obrazovkou a HEIDENHAIN iTNC 530			

3.3. Postup měření na stroji

Měření bylo uskutečněno na CNC frézce DMU 50, na které proběhlo měření v nezatěžovaných podmínkách stroje. Měření experimentu bylo realizováno pomocí měřicího systému Renishaw Ballbar QC20-W. Tato měřená CNC frézka je velmi časově vytížená, a z tohoto důvodu mohlo být měření rezervováno pouze na krátký časový termín. Při příchodu na pracoviště stroje byl stroj vizuálně zkontrolován a zapnut. Následně proběhlo jeho zahřátí na provozní teplotu. Mezitím se nastavily údaje o stroji a typu měření v softwaru měřicího zařízení Ballbar, přičemž se v tomto počítačovém softwaru vytvořily specifické programy pro jednotlivé měřené roviny, které se poté přenesly pomocí USB přenosného zařízení do počítače CNC frézky. Dalším úkonem bylo upnutí magnetického upínače do vřetena stroje, a také umístění druhého magnetického upínače na pracovní stůl stroje. Důležité bylo očištění magnetických ploch upínačů (nástrojové a středové misky), které bylo provedeno pomocí speciální čistící hmoty, a to z důvodu, aby se zamezil možný výskyt částeczek kovů na magnetických plochách. Nastavení nulového bodu a seřízení vzájemné polohy obou magnetických upínačů bylo uskutečněno pomocí ustavovací kuličky, přičemž magnetický upínač určený na pracovní stůl stroje byl vhodně zajištěn. Poté proběhla na CNC frézce kontrola jednotlivých programů pro příslušné měřené roviny, a to bez teleskopického lineárního snímače. Všechny programy byly funkční a nevykazovaly žádnou chybu, proto následujícím úkonem bylo zapnutí teleskopického lineárního snímače, a také jeho spárování s příslušným počítačem obsahující náležitý software (Renishaw Ballbar 20). Před každým samotným měřením byla provedena kalibrace teleskopického lineárního snímače, a to pomocí kalibrátoru. Tudiž okolní teplota i vlhkost prostředí, díky tomuto kalibrování, měly minimální vliv na samotné měření, a proto nebylo nutné se na teplotu a vlhkost okolního prostředí zaměřovat. Každé měření probíhalo principem najetím vřetena do základní polohy pro start testu, vložením teleskopického lineárního snímače mezi magnetické upínače, spuštěním testu v softwaru měřicího zařízení, spuštěním programu v měřeném stroji, přenosem a uložením naměřených hodnot do paměti softwaru měřicího zařízení, a opakováním měření pro příslušné roviny. Přičemž všechna jednotlivá měření byla realizována na stroji o hodnotě posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Po skončení měření byl teleskopický lineární snímač vypnut. Snímač i ostatní části měřicího zařízení byly z měřeného stroje odepnuty a uloženy zpět do přenosného kufříku. [16; 18; 20; 21]

3.4. Nejistoty měření

Účelem každého měření je vždy určení skutečné hodnoty prošetřované veličiny. Nicméně ve skutečnosti nelze žádnou metodou měření ani měřicím zařízením stanovit skutečnou hodnotu sledované veličiny. Protože během zjišťování sledované veličiny dochází k různým chybám, které mohou ovlivnit celkový výsledek měření. Tento výsledek měření se vždycky pohybuje v jistém intervalu kolem skutečné hodnoty, kterou prakticky nikdy nelze stanovit. Nejistotou měření se tedy rozumí parametr charakterizující interval (rozsah) hodnot kolem výsledku měření, který lze odůvodněně přiřadit hodnotě měřené veličiny. Podstatou je pravděpodobnostní princip, u něhož se předpokládá, že nejistota měření pokryje skutečnou hodnotu s předpokládanou pravděpodobností. [22; 23]

Bylo uskutečněno měření tří rovin. Každá rovina byla opakovatelně měřena, a to za účelem přiblížit se co nejblíže skutečným hodnotám. U roviny XY byly provedeny tři měření, u roviny YZ čtyři měření, a v rovině ZX také čtyři měření. Bylo tedy celkem provedeno jedenáct měření, které byly umožněny vůči časovému harmonogramu stroje. Z příslušných získaných naměřených hodnot byly dále vypočteny výběrové průměry (\bar{x}), standardní nejistoty typu A (u_A), a rozšířené nejistoty typu A (u_{As}). Jednotlivé výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách uvedených v kapitole 4. Vyhodnocení experimentu, přičemž byly vypočítány pomocí následujících vztahů:

Výběrový průměr naměřené veličiny \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [22; 24] \quad (1)$$

kde: x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x ,
 n ... počet měření.

Standardní nejistota typu A (u_A):

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [22; 24] \quad (2)$$

kde: $s(\bar{x})$... směrodatná odchylka,
 x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x ,
 \bar{x} ... výběrový průměr naměřené veličiny,
 n ... počet měření.

Z důvodu, že bylo uskutečněno méně než deset opakovaných měření, byla standardní nejistota typu A (u_A) následně korigována koeficientem rozšíření (k_s), který je uveden v tab. 4, a to pro pravděpodobnost 95%. [22; 24]

Tab. 4 – Hodnoty koeficientu rozšíření (k_s) pro pravděpodobnost 95% [22; 24]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	> 9
k_s	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

Rozšířená nejistota typu A (u_{As}):

$$u_{As} = k_s \cdot u_A \quad [22; 24] \quad (3)$$

kde: k_s ... koeficient rozšíření,
 u_A ... standardní nejistota typu A.

Vyjádření výsledku měřené veličiny X:

$$X = (\bar{x} \pm u_{As}) + \text{jednotka} \quad [22; 24] \quad (4)$$

kde: \bar{x} ... výběrový průměr naměřené veličiny,
 u_{As} ... rozšířená nejistota typu A.

3.4.1. Ukázka výpočtu výběrového průměru a nejistoty měření

Pro názornou ukázkou je uveden příklad výpočtu pro obousměrnou odchylku kruhovitosti G(b) z měření v rovině XY po 360° dráze (tab. 7), a to dle z výše uvedených vztahů, přičemž veškeré naměřené a výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách kapitoly 4. Vyhodnocení experimentu. Je nutné zdůraznit, že pro tyto výsledné hodnoty byly výpočty provedeny v počítačovém softwaru Microsoft Excel, kde se počítalo s nezaokrouhlovanými hodnotami. Kdežto u výpočtů v názorných ukázkách byly pro lepší přehled dosazovány zaokrouhlované hodnoty. Pro zmíněnou rovinu XY byly provedeny tři opakovatelné měření ($n = 3$), proto dle tab. 4 odpovídá hodnota koeficientu rozšíření $k_s = 2,3$ pro pravděpodobnost 95%.

Naměřené hodnoty pomocí systému Renishaw Ballbar QC20-W jsou vyjádřeny s přesností na desetinu mikrometru, a proto z tohoto důvodu jsou vypočtené výsledky v ukázce výpočtu také zaokrouhlovány na desetinné místo mikrometru, a dále výsledky standardní nejistoty typu A (u_A) a rozšířené nejistoty typu A (u_{As}) jsou zaokrouhlovány na bližší vyšší desetinné číslo. Díky tomuto je zachováno dodržení stejného řádu výsledků jako při měření, a také je dosaženo lepší přehlednosti výsledků pro ukázkou výpočtu.

Naměřené hodnoty pro názorný výpočet obousměrné odchylky kruhovitosti $G(b)$ z roviny XY:

$$x_1 = 9,9 [\mu m],$$

$$x_2 = 10,5 [\mu m],$$

$$x_3 = 10,4 [\mu m].$$

Výpočet výběrového průměru naměřené veličiny \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{n} \quad [22; 24] \quad (5)$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$\bar{x} = \frac{9,9 + 10,5 + 10,4}{3} = \frac{30,8}{3} = 10,266667 [\mu m] \quad (6)$$

Po zaokrouhlení

$$\bar{x} = \mathbf{10,3 [\mu m]} \quad (7)$$

Výpočet standardní nejistoty typu A (u_A):

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \rightarrow \quad [22; 24] \quad (8)$$

$$\rightarrow u_A = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$\begin{aligned}
 u_A &= \sqrt{\frac{(9,9 - 10,3)^2 + (10,5 - 10,3)^2 + (10,4 - 10,3)^2}{3 \cdot (3 - 1)}} = & (9) \\
 &= \sqrt{\frac{(-0,4)^2 + (0,2)^2 + (0,1)^2}{3 \cdot 2}} = \sqrt{\frac{0,16 + 0,04 + 0,01}{6}} = \\
 &= \sqrt{\frac{0,21}{6}} = 0,187083 \text{ } [\mu\text{m}]
 \end{aligned}$$

Po zaokrouhlení

$$u_A = 0,2 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (10)$$

Výpočet rozšířené nejistoty typu A (u_{As}):

$$u_{As} = k_s \cdot u_A \quad [22; 24] \quad (11)$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$u_{As} = 2,3 \cdot 0,2 = 0,46 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (12)$$

Po zaokrouhlení

$$u_{As} = 0,5 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (13)$$

Zápis výsledné hodnoty obousměrné odchylky kruhovitosti G(b) včetně nejistoty pro rovinu XY:

$$X = (\bar{x} \pm u_{As}) + \text{jednotka} \quad [22; 24] \quad (14)$$

Po dosazení vypočtených hodnot do vztahu

$$\mathbf{G(b) = (10,3 \pm 0,5) \mu m} \quad (15)$$

3.5. Hrubé chyby

Každý průběh měření a kontroly probíhá za určitých konkrétních podmínek, jenž tento průběh různým způsobem ovlivňují. Během každého měření vznikají chyby, které jsou důsledkem nedokonalosti lidských smyslů, nemožnosti přesně dodržet konstantní podmínky měření, nepřesnosti měřicích prostředků, nemožnosti vyloučit rušivé vlivy apod. Přičemž přítomnost chyb se projevuje tím, že u opakování téhož měření výsledky měření vykazují rozptyl. Hrubé chyby mohou být způsobeny hrubou závadou na měřicím prostředku, nesprávným čtením, nesprávným zápisem naměřené hodnoty, nesprávným postupem, či manipulací a podobně. Měření zatížené hrubou chybou se značně liší od ostatních hodnot série opakovaných měření. Výsledek měření ovlivněný hrubou chybou je nepoužitelný, a proto se ze souboru naměřených hodnot vyloučí. Nicméně pro toto rozhodnutí o vyloučení (ponechání) naměřených hodnot je potřeba provést test odlehlosti. [22; 25]

Postup testu odlehlosti je následovný [22; 25]:

- a) Z uspořádaného souboru naměřených hodnot se vypočte výběrový průměr naměřené veličiny \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [22; 25] \quad (16)$$

kde: x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x ,
 n ... rozsah výběru (respektive počet měření).

A také výběrová směrodatná odchylka $s(\bar{x})$:

$$s(\bar{x}) = u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [22; 25] \quad (17)$$

kde: u_A ... standardní nejistota typu A,
 x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x ,
 \bar{x} ... výběrový průměr naměřené veličiny,
 n ... rozsah výběru (respektive počet měření).

- b)** Pro posouzení odlehlosti extrémních hodnot daného souboru se vypočtou normované hodnoty H_i a H_k :

$$\text{pro } x_i < \bar{x} \text{ platí: } H_i = \frac{\bar{x} - x_i}{s(\bar{x})} = \frac{\bar{x} - x_i}{u_A} \quad [22; 25] \quad (18)$$

$$\text{pro } x_i > \bar{x} \text{ platí: } H_k = \frac{x_i - \bar{x}}{s(\bar{x})} = \frac{x_i - \bar{x}}{u_A} \quad [22; 25] \quad (19)$$

kde: \bar{x} ... výběrový průměr naměřené veličiny,
 x_i ... jednotlivé naměřené hodnoty veličiny x
 $s(\bar{x})$... směrodatná odchylka,
 u_A ... standardní nejistota typu A.

- c)** Z tab. 5 se určí tabulková mezní hodnota H pro stanovenou pravděpodobnost 95% a rozsah výběru (n).

Tab. 5 – Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost 95% a rozsahu výběru (n) [22; 25]

n	3	4	5	6	7	8	9	10
H	1,15	1,46	1,67	1,82	1,94	2,03	2,11	2,18

- d)** Konečným bodem tohoto postupu je provedení porovnání vypočtené veličiny H_i nebo H_k s tabulkovou mezní hodnotou H (tab. 5) pro stanovenou pravděpodobnost 95% a rozsah výběru (n). Je-li $H_i < H$ nebo $H_k < H$, naměřená hodnota není zatížena hrubou chybou a ponechá se v souboru naměřených hodnot. Pokud je vypočtená hodnota H_i nebo H_k větší než tabulková mezní hodnota H , pak testovaná hodnota je zatížena hrubou chybou a ze souboru se vyloučí a postup se opakuje.

3.5.1. Ukázka výpočtu testu odlehlosti

Pro názornou ukázkou výpočtu testu odlehlosti je uveden příklad výpočtu pro naměřené hodnoty kruhovitosti G ve směru hodinových ručiček (CW) pro měřenou rovinu YZ po 220° dráze (tab. 9). Pro tuto zmíněnou rovinu YZ byly provedeny čtyři opakovatelné měření ($n = 4$).

Uspořádaný soubor naměřených hodnot kruhovitosti G ve směru hodinových ručiček z měřené roviny YZ pro názorný výpočet testu odlehlosti:

$$x_1 = 342,6 [\mu m],$$

$$x_2 = 489,5 [\mu m],$$

$$x_3 = 448,0 [\mu m],$$

$$x_4 = 367,5 [\mu m].$$

Ukázka výpočtu testu odlehlosti pro výše zmíněný uspořádaný soubor naměřených hodnot:

- a) Výpočet výběrového průměru naměřené veličiny \bar{x} pro daný uspořádaný soubor naměřených hodnot:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{n} \quad [22; 25] \quad (20)$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$\bar{x} = \frac{342,6 + 489,5 + 448,0 + 367,5}{4} = \frac{1647,6}{4} = 411,9 [\mu m] \quad (21)$$

A výpočet výběrové směrodatné odchylky $s(\bar{x})$:

$$s(\bar{x}) = u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \rightarrow \quad [22; 24] \quad (22)$$

$$\rightarrow u_A = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + (x_4 - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$\begin{aligned}
 s(\bar{x}) = u_A &= \sqrt{\frac{[(342,6 - 411,9)^2 + (489,5 - 411,9)^2 + \\ &+ (448,0 - 411,9)^2 + (367,5 - 411,9)^2]}{4 \cdot (4 - 1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{(-69,3)^2 + (77,6)^2 + (36,1)^2 + (-44,4)^2}{4 \cdot 3}} = \\ &= \sqrt{\frac{14098,82}{12}} = 34,277 \text{ } [\mu\text{m}]
 \end{aligned} \tag{23}$$

Kvůli tomu, že bylo uskutečněno méně než deset opakovaných měření, musí se standardní nejistota typu A (u_A) následně korigovat koeficientem rozšíření (k_s), který je roven $k_s = 1,7$ pro rozsah výběru (respektive počet vhodných měření) $n = 4$ (viz tab. 4). [22; 24]

Výpočet rozšířené nejistoty typu A (u_{As}):

$$u_{As} = k_s \cdot s(\bar{x}) = k_s \cdot u_A \tag{24} \quad [22; 24]$$

Po dosazení hodnot do vztahu

$$u_{As} = 1,7 \cdot 34,277 = 58,271 \text{ } [\mu\text{m}] \tag{25}$$

- b)** Z důvodu, že bylo uskutečněno méně než deset opakovaných měření, a musela se standardní nejistota typu A (u_A) následně korigovat koeficientem rozšíření (k_s), tak je do vzorečku pro výpočet normovaných hodnot pro posouzení odlehlosti extrémních hodnot daného souboru naměřených hodnot dosazována rozšířená nejistota typu A (u_{As}):

$$\text{pro } x_i < \bar{x} \text{ platí: } H_i = \frac{\bar{x} - x_i}{s(\bar{x})} = \frac{\bar{x} - x_i}{u_A} \rightarrow H_i = \frac{\bar{x} - x_i}{u_{As}} \tag{26} \quad [22; 25]$$

$$\text{pro } x_i > \bar{x} \text{ platí: } H_k = \frac{x_i - \bar{x}}{s(\bar{x})} = \frac{x_i - \bar{x}}{u_A} \rightarrow H_k = \frac{x_i - \bar{x}}{u_{As}} \tag{27} \quad [22; 25]$$

Pro uspořádaný soubor naměřených hodnot platí, včetně dosazení hodnot:

$$\text{pro } x_i < \bar{x} \text{ platí: } H_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{u_{As}} = \frac{411,9 - 342,6}{58,271} = \frac{69,3}{58,271} = 1,189 [-] \quad (28)$$

$$H_4 = \frac{\bar{x} - x_4}{u_{As}} = \frac{411,9 - 367,5}{58,271} = \frac{44,4}{58,271} = 0,762 [-] \quad (29)$$

$$\text{pro } x_i > \bar{x} \text{ platí: } H_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{u_{As}} = \frac{489,5 - 411,9}{58,271} = \frac{77,6}{58,271} = 1,332 [-] \quad (30)$$

$$H_3 = \frac{x_3 - \bar{x}}{u_{As}} = \frac{448,0 - 411,9}{58,271} = \frac{36,1}{58,271} = 0,620 [-] \quad (31)$$

c) Tabulková mezní hodnota H pro stanovenou pravděpodobnost 95% a rozsah výběru (respektive počet měření $n = 4$) činí $H = 1,46$ a to dle tab. 5.

d) Porovnání vypočtených normovaných hodnot H_i a H_k s tabulkovou mezní hodnotou H :

$$\text{pro } x_1: \quad H_1 < H \rightarrow 1,189 < 1,46 \quad (32)$$

vyhovuje,

$$\text{pro } x_2: \quad H_2 < H \rightarrow 1,332 < 1,46 \quad (33)$$

vyhovuje,

$$\text{pro } x_3: \quad H_3 < H \rightarrow 0,620 < 1,46 \quad (34)$$

vyhovuje,

$$\text{pro } x_4: \quad H_4 < H \rightarrow 0,762 < 1,46 \quad (35)$$

vyhovuje.

Výsledkem testu odlehlosti pro výše zmíněný uspořádaný soubor naměřených hodnot je, že tyto naměřené hodnoty vyhovují, neboť žádná vypočtená normovaná hodnota nepřekročila tabulkovou mezní hodnotu $H = 1,46$ pro pravděpodobnost 95%. Z tohoto vyplývá, že všechny tyto naměřené hodnoty, z výše zmíněného uspořádaného souboru, nejsou zatíženy hrubou chybou, a proto se ponechají v souboru naměřených hodnot.

4. Vyhodnocení experimentu

Měření bylo provedeno ve třech různých rovinách, přičemž každá rovina byla opakovatelně měřena. U roviny XY byly uskutečněny tři opakovatelná měření po 360° dráze, dále čtyři opakovatelná měření po 220° dráze u roviny YZ, a v poslední měřené rovině (ZX) byly provedeny také čtyři měření po 220° dráze. Celkem tedy bylo provedeno jedenáct měření, která byla poskytnuta na úkor časovému harmonogramu stroje.

Všechna tato zmíněná měření byla provedena pomocí sto milimetrového adaptéru, přičemž před každým jednotlivým měřením byla pomocí kalibrátoru aplikována kalibrace délky snímače. Okolní teplota i vlhkost prostředí, díky kalibrování, měly minimální vliv na samotné měření, a tudíž nebylo nutné se na teplotu a vlhkost okolního prostředí zaměřovat. Všechna měření byla uskutečněna na měřeném stroji o hodnotě posuvu $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Během měření byly pomocí systému Renishaw Ballbar QC20-W ukládány záznamy z měření. Tyto záznamy obsahují naměřené hodnoty ze všech uskutečněných měření, které jsou následně v této diplomové práci vyhodnoceny. V následujících podbodech jsou naměřené hodnoty ze všech měření zobrazeny v příslušných jednotlivých tabulkách (tj. v tab. 6 až tab. 11), ve kterých jsou tyto naměřené hodnoty daných chyb uváděny v jednotkách, ale také i v procentech. To znamená, že chyba s nejvyšší procentuální hodnotou nejvíce ovlivňuje celkovou chybu kruhovitosti a naopak. Tyto zmíněné tabulky obsahují i výsledky z výpočtů testu odlehlosti a rozšířených nejistot měření pro pravděpodobnost 95%, přičemž všechny výpočty byly provedeny pomocí počítačového softwaru Microsoft Excel, ve kterém se počítalo s nezaokrouhlovanými hodnotami. Nicméně tyto výsledné výsledky měření jsou v těchto zmíněných tabulkách vhodně zaokrouhleny, aby byl dodržen řád desetinného místa mikrometru a $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$.

Všechny naměřené hodnoty ze všech měření byly testovány na hrubou chybu (testem odlehlosti). Hodnoty, které jsou zatížené hrubou chybou, se musí ze souboru naměřených hodnot vyloučit a nesmí se s nimi dále počítat. Proto hodnoty zatížené hrubou chybou jsou tedy z tohoto důvodu zvýrazněny červeným zbarvením a šedým přeškrtnutím,

což vyjadřuje jejich vyloučení, jak lze spatřit na obr. 9, který vysvětluje princip tabulek následujících podkapitol (tj. v tab. 6 až tab. 11). Dále je z tohoto obrázku patrné, že psané znaménka (plus nebo minus) u os, ve sloupci Ballbar diagnostika, reprezentují polohu snímače v souřadném systému stroje, přičemž tato poloha může být jak v horní, tak i dolní úvratí. Každá z úvratí může mít buď kladnou, nebo zápornou hodnotu odchylky od ideální kružnice.

Vyloučená hodnota, neboť byla zatížena hrubou chybou
(dle testu odlehlosti pro pravděpodobnost 95 %)

Reprezentování polohy snímače v souřadném systému stroje (horní nebo dolní úvrat')

Kladné znaménko (+) vyjadřuje horní úvrat'

Záporné znaménko (-) vyjadřuje dolní úvrat'

Ballbar diagnostika		Číslo měření					
		1		2		3	
		μm	%	μm	%	μm	
Zpoždění serva	+Z	-19,8	3	9,3	2	-2,6	
Zpoždění serva X	+X	21,4	3	-2,6	1	18,3	
	-X	-8,2		-4,3		-36,5	
Příčná vůle Z	+Z	-105,2	16	-78,5	16	-0,5	

Obr. 9 – Vysvětlení principu tabulek pro následující podkapitoly

Všechny záznamy z měření jsou poskytnuty v elektronické příloze. Příloha A zobrazuje názornou ukázkou záznamu z prvního měření roviny ZX po 220° dráze.

4.1. Měření v rovině XY po 360° dráze

U této roviny XY po 360° dráze byly provedeny tři opakovatelná měření. Všechny naměřené hodnoty, z těchto třech opakovatelných měření, nejsou zatíženy hrubou chybou, a to dle testu odlehlosti pro pravděpodobnost 95%.

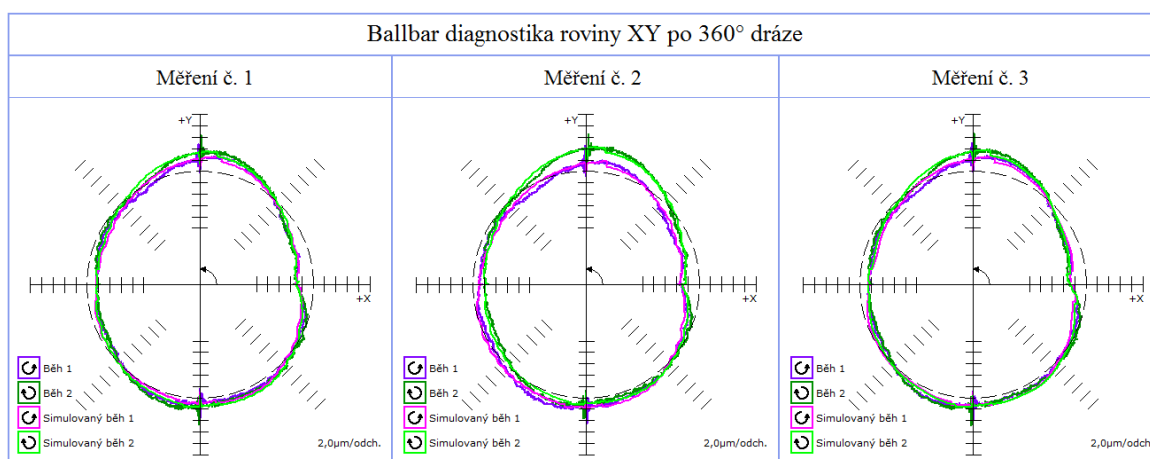
Tab. 6 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině XY po 360° dráze

Ballbar diagnostika		Číslo měření						Výsledek měření pro P = 95 %
		1		2		3		μm
		μm	%	μm	%	μm	%	
Relativní chyba odměřování		-7,4	34	-7,4	33	-7,6	33	-7,5 ± 0,2
Zpoždění serva X	+X	-0,7	7	-0,9	8	-0,4	4	-0,7 ± 0,4
	-X	-0,4		-0,4		-0,3		-0,4 ± 0,1
Zpoždění serva Y	+Y	-2,1	22	-2,1	22	-2,1	21	-2,1 ± 0,0
	-Y	-2,4		-2,5		-2,4		-2,4 ± 0,1
Příčná vůle X	+X	0,8	6	1,0	8	0,8	4	0,9 ± 0,2
	-X	0,4		0,7		0		0,4 ± 0,5
Příčná vůle Y	+Y	0,6	4	1,0	6	1	6	0,9 ± 0,4
	-Y	0,2		0,0		-0,1		0,0 ± 0,3
Mrtvý chod X	+X	0,1	1	0,0	0	0,1	1	0,1 ± 0,1
	-X	0,0		0,0		-0,1		0,0 ± 0,1
Mrtvý chod Y	+Y	-0,2	2	-0,3	2	-0,3	2	-0,3 ± 0,1
	-Y	0,2		0,2		0,2		0,2 ± 0,0
Kolmost		μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹
		2,8	2	0,1	0	1,4	1	1,4 ± 1,8
Kruhovitost		μm		μm		μm		μm
		9,9		10,5		10,4		10,3 ± 0,5

Naměřené hodnoty pomocí Ballbar diagnostiky roviny XY, a jejich výsledky rozšířených nejistot měření typu A pro pravděpodobnost 95%, jsou zobrazeny v tab. 6.

Z této Ballbar diagnostiky veškerých chyb je procentuálně nejvíce zastoupena relativní chyba odměřování, která činí v prvním měření 34% a ve zbylých dvou měření 33%. Výsledek měření pro tuto relativní chybu odměřování činí $-7,5 \pm 0,2$ μm, kde její záporná hodnota znamená předbíhání pohonu osy Y před pohonem osy X. Tohle předbíhání pohonu osy právě způsobuje oválný tvar (někdy nazývaný tvar burského oříšku) výsledného grafu (obr. 10), u něhož velikost deformace v důsledku relativní chyby měření

není ovlivněna směrem snímáním dat (ve směru, nebo proti směru hodinových ručiček). Tato chyba obvykle nebývá ovlivněna posuvem stroje. Příčinou může být chybná osa kuličkového šroubu nebo dochází k přehřívání a následné chybě rozteče kuličkového šroubu. Na stroji tak může působit úhlová chyba, která při pohybu u osy X či Y způsobuje házení v rovině testu. Důvodem je nejpravděpodobněji nepřímost nebo nedostatečná tuhost vedení osy. Důsledkem této chyby je, že součásti obráběné strojem budou vykazovat rozměrové chyby. I když tato relativní chyba odměřování nejvíce ovlivňuje celkovou chybu kruhovitosti, tak její hodnota není prozatím rapidně vysoká. Doporučením je zkontrolovat stav kuličkového šroubu, a zdali se nepřehřívá. V případě potřeby provést jeho opravu nebo výměnu. Také by bylo dobré zkontrolovat vedení stroje, jestli jsou přímá. Pokud nejsou přímá, je nutné provést jejich nové vyrovnaní nebo výměnu. [16]

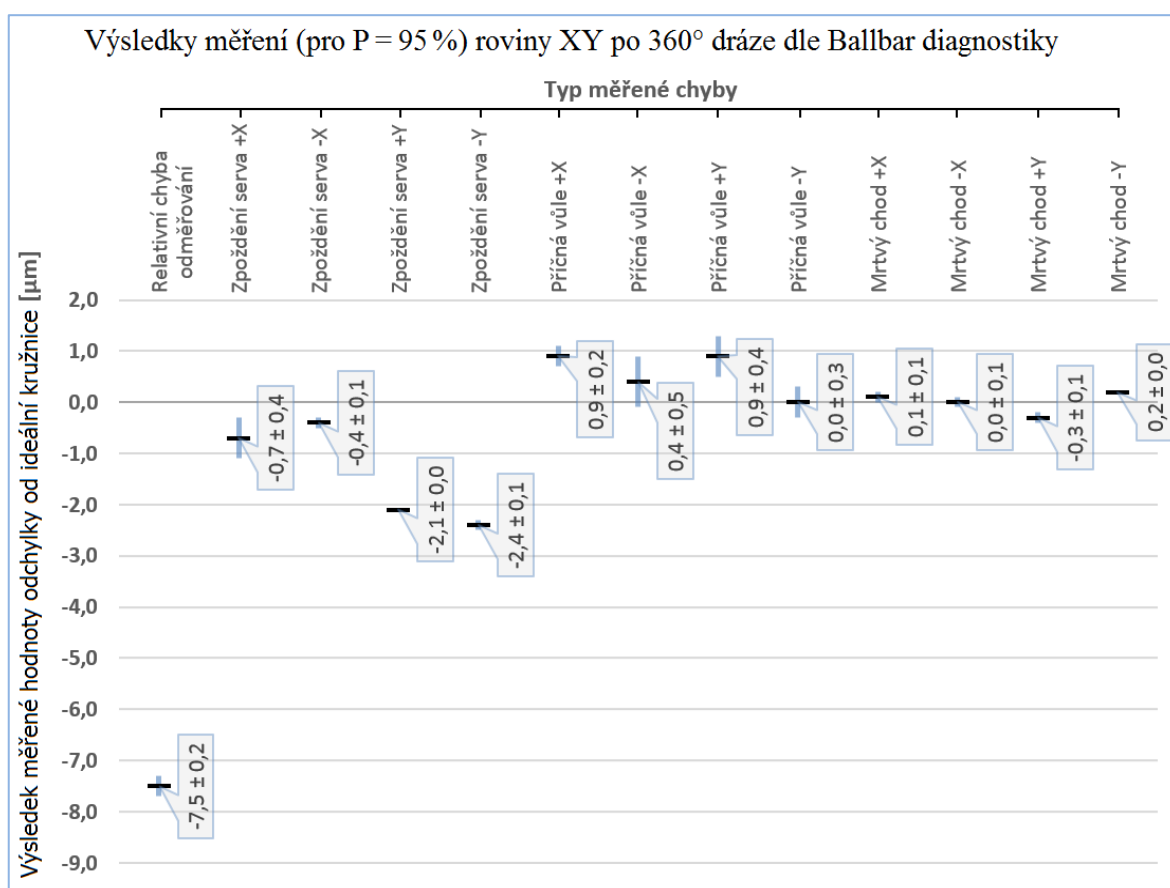


Obr. 10 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny XY po 360° dráze

Druhou nejvíce zastoupenou chybou z této diagnostiky (tab. 6) je zpoždění serva v ose Y, jenž činí v prvním i druhém měření 22% a ve třetím měření 21%. Její výsledek měření pro horní úvrat' je roven $-2,1 \pm 0,0 \mu\text{m}$, a pro dolní úvrat' činí $-2,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$. Jedná se o krátké špičky začínající na osách. Na obr. 10 si lze všimnout těchto špiček ve všech měření, a to jak na horní, tak i na dolní úvrat' osy Y. Velikost těchto špiček se často mění v závislosti na velikosti zvoleného posuvu. Důsledek těchto špiček je, že kruhová interpolovaná dráha řezu zanechá malou plošku, za níž následuje zpětný krok. Doporučením je udělat více testů o různých hodnotách posuvů, a zjistit tak, při jakém posuvu stroje jsou efekty těchto špiček nejmenší. K výslednému obrábění na čisto, při kruhové interpolaci, použít takový posuv, který byl zjištěn dle testů s nejlepšími výsledky. To samé platí pro třetí nejvíce zastoupenou chybu, kterou je zpoždění serva v ose X, jenž činí výrazně menší procentuální zastoupení. [16]

Ostatní zastoupené chyby z této Ballbar diagnostiky mají značně nižší procentuální podíl, a proto ovlivňují méně celkovou chybu kruhovitosti. Čtvrtou a pátou nejvíce zastoupenou chybou jsou tedy příčná vůle osy X, a příčná vůle osy Y. Hlavní příčinou těchto příčných vůlí je vůle ve vedení stroje. Důsledkem může být, že při obrábění bude stroj produkovat interpolované otvory nekruhového tvaru. Další zastoupenou chybou je mrtvý chod v ose Y, která činí ve všech měření 2%. Jedná se o skok nebo skoky směrem ven v začátku na ose, nicméně toto je v této měřené rovině téměř nepatrné. To samé platí i pro zastoupenou chybu mrtvého chodu v ose X, která má nejmenší procentuální podíl. Také chyba kolmosti má velmi malé procentuální zastoupení, a její kladná hodnota naznačuje, že úhel mezi dvěma kladnými směry os přesahuje hodnotu 90° . Nicméně její hodnota ($1,4 \pm 1,8 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) je velmi malá, a lze jí v této rovině zanedbat. [16]

Pro lepší přehled a orientaci jsou tyto výše zmíněné výsledky (z tab. 6) zobrazeny na obr. 11, který vyjadřuje jejich grafické znázornění.

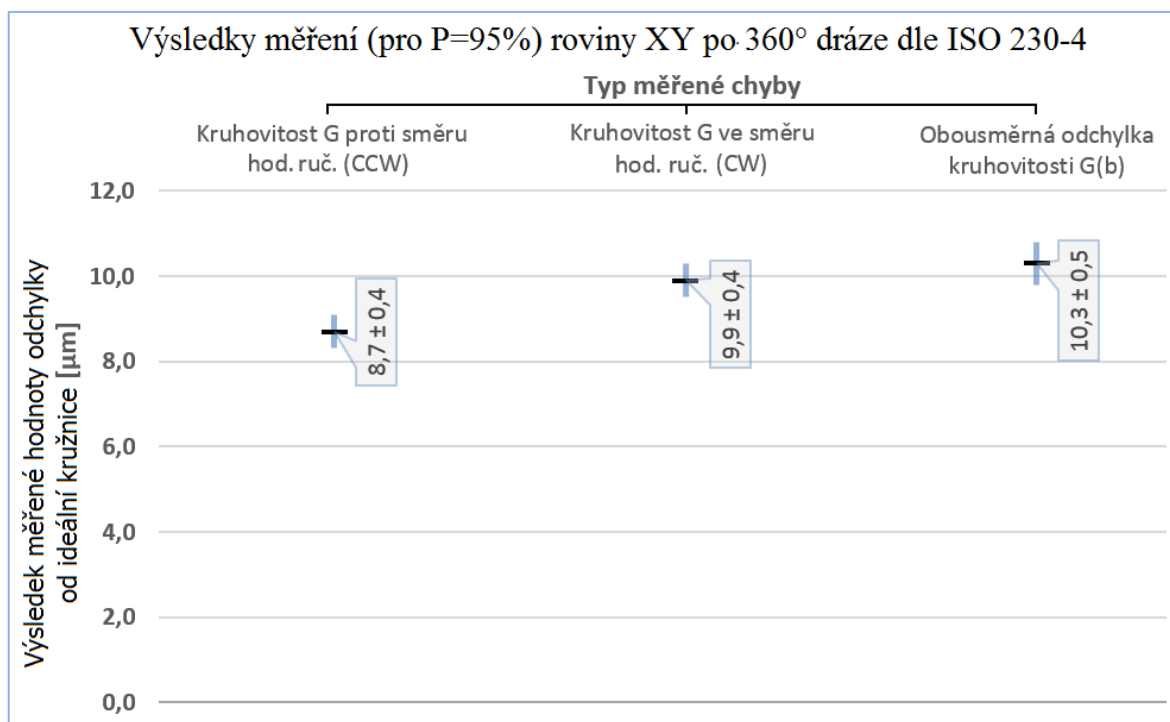


Obr. 11 – Graf výsledků měření roviny XY po 360° dráze dle Ballbar diagnostiky

Tab. 7 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině XY po 360° dráze

Ballbar hodnoty dle ISO 230-4	Číslo měření			Výsledek měření pro P = 95 %
	1	2	3	
	μm	μm	μm	μm
Kruhovitost G proti směru hod. ruč. (CCW)	8,4	8,9	8,8	$8,7 \pm 0,4$
Kruhovitost G ve směru hod. ruč. (CW)	9,8	9,7	10,2	$9,9 \pm 0,4$
Obousměrná odchylka kruhovitosti G(b)	9,9	10,5	10,4	$10,3 \pm 0,5$

V tab. 7 jsou zobrazeny výsledné Ballbar hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4, a to včetně jejich výsledků rozšířených nejistot měření typu A pro pravděpodobnost 95%. Grafické znázornění těchto výsledků je zobrazeno v obr. 12. Lze si všimnout, že hodnoty obousměrné odchylky kruhovitosti G(b) dle normy ISO 230-4 dosáhla zcela totožného výsledku (tab. 7), jako kruhovitost dle Ballbar diagnostiky (tab. 6), a to v obou případech o hodnotě výsledku měření $10,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$.



Obr. 12 – Graf výsledků měření roviny XY po 360° dráze dle ISO 230-4

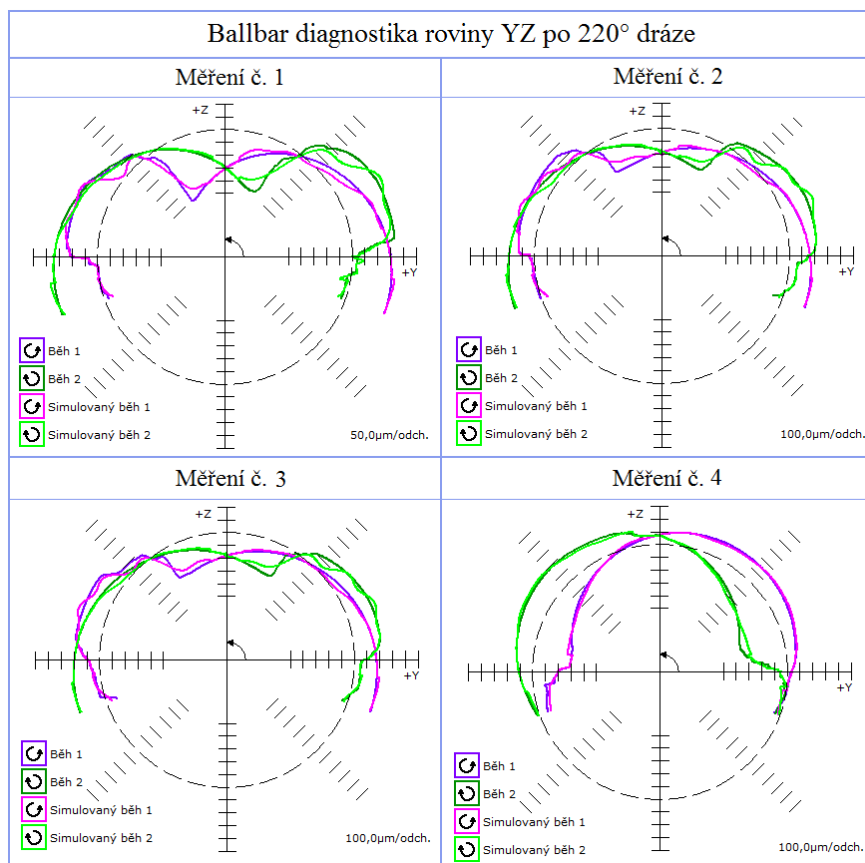
4.2. Měření v rovině YZ po 220° dráze

V této rovině YZ po 220° dráze bylo provedeno čtyř opakovatelných měření. Některé naměřené hodnoty, z těchto čtyř měření, jsou dle testu odlehlosti pro pravděpodobnost 95% zatíženy hrubou chybou, a proto byly vyloučeny pro následné výpočty rozšířených nejistot měření. Z těchto čtyř opakovatelných měření bylo nejvíce zatížené hrubou chybou měření číslo čtyři.

Tab. 8 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině YZ po 220° dráze

Ballbar diagnostika		Číslo měření								Výsledek měření pro P = 95 %
		1		2		3		4		
		μm	%	μm	%	μm	%	μm	%	μm
Zpoždění serva Y	+Y	-43,1	11	16,3	3	-14,9	3	37,7	7	-1,0 ± 30,2
	-Y	-13,6		11,1		-10,8		-17,4		-13,9 ± 4,4
Zpoždění serva +Z		3,3	1	-17,3	3	11,4	2	7,1	1	7,3 ± 5,4
Příčná vůle Y	+Y	27,1	4	-21,8	6	30,3	5	-110,4	19	11,9 ± 38,8
	-Y	-5,6		-47,5		14,4		-89,5		-12,9 ± 42,0
Příčná vůle Z	+Z	-56,6	11	-35,7	5	-25,7	4	-2,8	7	30,2 ± 19,0
	-Z	-22,9		-27,8		-14,8		-57,4		-21,8 ± 8,8
Mrtvý chod Y	+Y	9,6	7	-1,4	0	4,9	1	104,8	20	4,4 ± 7,4
	-Y	27,8		2,6		4,1		51,7		11,5 ± 18,8
Mrtvý chod +Z		-25,1	6	-122,7	21	-118,2	23	-16,4	3	-70,6 ± 49,1
Kolmost		μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹
		-185,5	5	-177,6	3	-61,8	1	510	10	-141,6 ± 92,0
Kruhovitost		μm		μm		μm		μm		μm
		423,6		486,0		485,1		524,7		498,6 ± 30,1

Tab. 8 zobrazuje naměřené hodnoty pomocí Ballbar diagnostiky v rovině YZ, a to včetně jejich výsledků rozšířených nejistot měření typu A pro pravděpodobnost 95%. Jednotlivé hodnoty chyb, z každého čísla měření, se značně liší, a to má za následek velké rozpětí výsledků měření (pro P = 45%). Nejvýrazněji se odlišuje od ostatních měření číslo 4, u něhož bylo vyloučeno nejvíce hodnot, a to dle testu odlehlosti, a také jeho grafické znázornění je zcela jiné vůči ostatním měřením, jak lze spatřit na obr. 13.



Obr. 13 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny YZ po 220° dráze

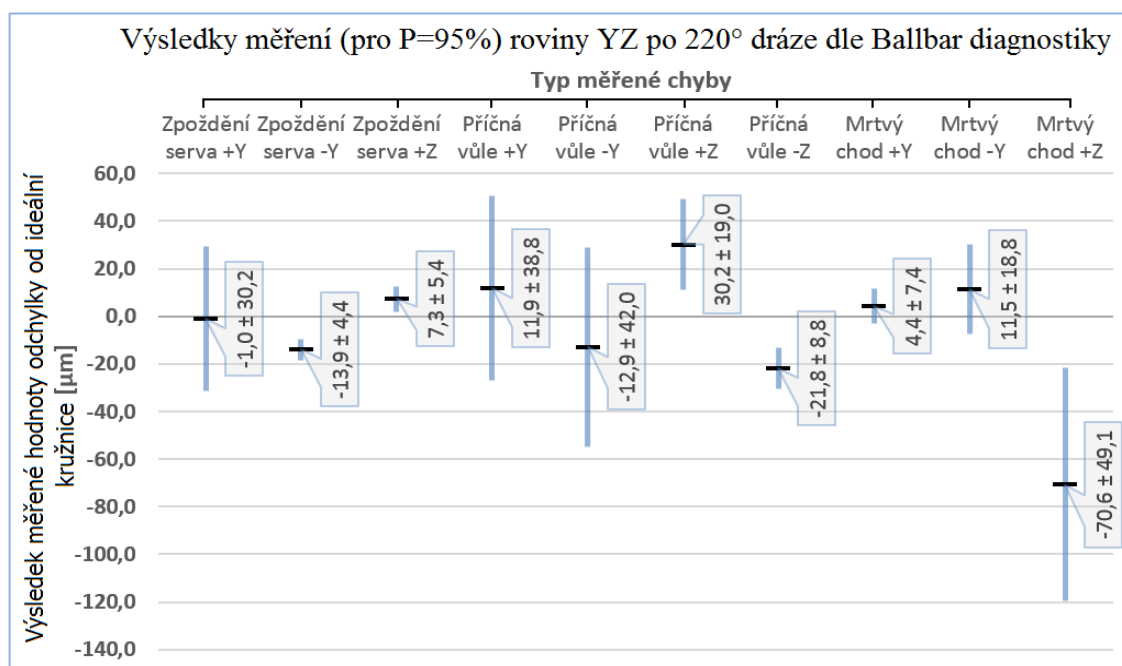
Z veškerých chyb této Ballbar diagnostiky je nejvíce procentuálně zastoupena chyba mrtvého chodu osy Z v horní úvratí, jehož hodnota je rovna $-70,6 \pm 49,1 \mu\text{m}$. Tato hodnota je výrazně vysoká. Jedná se o výrazný skok nebo skoky směrem ven se začátkem na ose. Posuv obvykle na velikost této chyby nemá vliv. Nejčastější příčinou této chyby je vůle v pohonu osy stroje. Tato vůle bývá většinou zapříčiněna pohybem volného konce kuličkového šroubu nebo opotřebenou pohybovou maticí. Další možnou příčinou může být vůle ve vedení stroje, která při změně směru pohybu stroje způsobuje prodlevu v pohybu. Někdy je tato chyba zapříčiněna následkem nadměrného namáhání, které způsobuje kroucení kuličkového šroubu. Doporučením je odstranit veškerou vůli v pohonu a ve vedení stroje, což může znamenat výměnu opotřebených součástí. [16]

Další hodně procentuálně zastoupenou chybou je příčná vůle v ose Z, kde výsledek měření pro horní úvrat' je roven $30,2 \pm 19,0 \mu\text{m}$, a pro dolní úvrat' činí $-21,8 \pm 8,8 \mu\text{m}$. Hlavní příčinou této chyby je vůle ve vedení stroje. To má za následek, že při obrábění bude stroj produkovat interpolované otvory nekruhového tvaru. Tuto chybu lze vyřešit úpravou nebo renovací vedení stroje, což odstraní každou existující vůli. To samé platí pro

chybu příčné vůle v ose Y, kde je přibližně stejný procentuální podíl, a výsledek pro horní úvrať činí $11,9 \pm 38,8 \mu\text{m}$, a pro dolní úvrať je roven $-12,9 \pm 42,0 \mu\text{m}$. [16]

Také chyba zpoždění serva v ose Y vykazuje vyšší procentuální zastoupení. Pojednává se o krátké špičky začínajících u osy Y, jak lze spatřit na obr. 13. Důsledkem je vznik malých plošek na povrchu kruhově interpolované dráhy. Toho lze částečně zamezit vhodnou volbou hodnoty posuvu. Tato vhodná hodnota posuvu se zjistí provedením více testů o různých hodnotách posuvů, a vyhodnotí se, při jakém posuvu stroje jsou tyto špičky nejmenší. Následuje chyba kolmosti, která se rovná hodnotě $-141,6 \pm 92,0 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$. To znamená, že osy mohou být prohnuty místně nebo se může jednat o celkovou nevyrovnanost os stroje. Případně vedení stroje může být příliš opotřeбенé a při pohybu může v osách stroje vznikat určitá vůle. Pro potvrzení je dobré udělat opakování testu v různých místech, a zjistit tak, zda se chyba kolmosti projevuje místně (jen v určité části stroje), nebo zda ovlivňuje stroj jako celek. Méně zastoupenou procentuální chybou je mrtvý chod osy Y. Hlavní příčinou této chyby je vůle v pohonu osy stroje, a zvolený posuv stroje na tuto chybu zpravidla nemá vliv. Nejmenší procentuální zastoupení v této rovině YZ má chyba zpoždění serva osy Z v horní úvratí, která je ovlivňována zvolenou hodnotou posuvu stroje. [16]

Výše zmíněné výsledky (z tab. 8) jsou graficky zobrazeny na obr. 14, a to pro lepší přehled a orientaci.

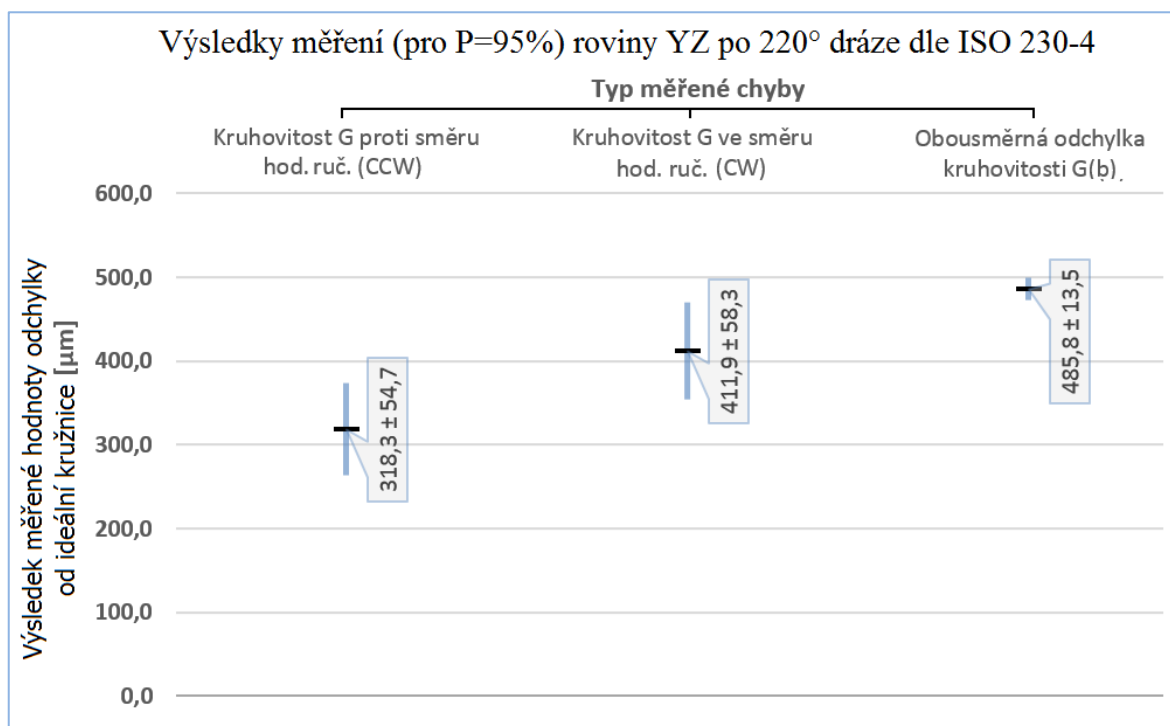


Obr. 14 – Graf výsledků měření roviny YZ po 220° dráze dle Ballbar diagnostiky

Tab. 9 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině YZ po 220° dráze

Ballbar hodnoty dle ISO 230-4	Číslo měření				Výsledek měření pro P = 95 % μm
	1	2	3	4	
	μm	μm	μm	μm	
Kruhovitost G proti směru hod. ruč. (CCW)	296,9	365,8	495,8	292,3	318,3 ± 54,7
Kruhovitost G ve směru hod. ruč. (CW)	342,6	489,5	448,0	367,5	411,9 ± 58,3
Obousměrná odchylka kruhovitosti G(b)	353,1	480,8	497,4	479,1	485,8 ± 13,5

Výsledné Ballbar hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4, včetně jejich výsledků rozšířených nejistot měření typu A (pro pravděpodobnost 95%), jsou zobrazeny v tab. 9. Dále jsou tyto výsledky graficky znázorněny na obr. 15. Tyto hodnoty odchylek kruhovitosti jsou velmi vysoké, což signalizuje, že stroj může být nějakým způsobem poškozen či mít opotřebované některé své části, které mohou projevoval určité vůle v pohonu osy nebo ve vedení stroje.



Obr. 15 – Graf výsledků měření roviny YZ po 220° dráze dle ISO 230-4

4.3. Měření v rovině ZX po 220° dráze

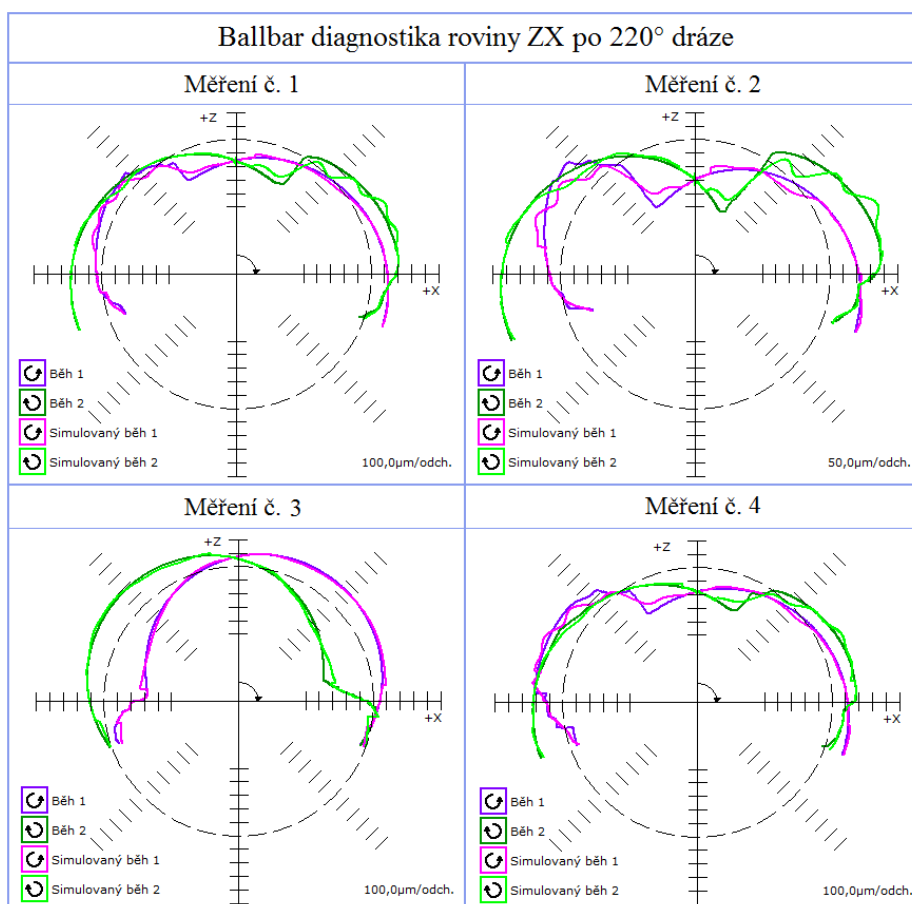
V rovině ZX po 220° dráze bylo uskutečněno čtyři opakovatelná měření. Dle testu odlehlosti pro pravděpodobnost 95% jsou některé z naměřených hodnot zatíženy hrubou chybou, a proto byly vyloučeny pro následné výpočty rozšířených nejistot měření. Z těchto opakovatelných měření obsahuje nejvyššího počtu naměřených hodnot zatížených hrubou chybou měření číslo tři.

Tab. 10 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině ZX po 220° dráze

Ballbar diagnostika		Číslo měření								Výsledek měření pro P = 95 %
		1		2		3		4		
		μm	%	μm	%	μm	%	μm	%	
Zpoždění serva +Z		-19,8	3	9,3	2	-2,6	0	14,5	2	7,1 ± 11,7
Zpoždění serva X	+X	21,4	3	-2,6	1	18,3	6	-6,2	5	7,7 ± 12,1
	-X	-8,2		-4,3		-36,5		34,5		-16,3 ± 23,4
Příčná vůle Z	+Z	-105,2	16	-78,5	16	-0,5	6	-4,5	7	-47,2 ± 44,9
	-Z	-126,8		-109,1		-53,0		-69,7		89,7 ± 29,1
Příčná vůle X	+X	-51,4	4	12,1	1	-147,2	26	8,7	9	-10,2 ± 47,5
	-X	31,3		-15,9		-141,7		87,5		34,3 ± 68,8
Mrtvý chod +Z		-126,6	17	-102,6	17	-23,1	4	-106,0	16	-111,7 ± 17,3
Mrtvý chod X	+X	31,6	4	42,9	7	122,0	22	23,6	3	32,7 ± 12,9
	-X	19,6		41,7		61,9		4,6		32,0 ± 21,4
Kolmost		μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹	%	μm·m ⁻¹
		109,4	2	271,8	4	441,5	8	834,8	12	274,2 ± 220,6
Kruhovitost		μm		μm		μm		μm		μm
		500,3		474,4		526,2		502,9		509,8 ± 37,3

Naměřené hodnoty pomocí Ballbar diagnostiky v rovině ZX po 220° dráze, a jejich výsledků rozšířených nejistot měření typu A (pro pravděpodobnost 95%), jsou zobrazeny v tab. 10. Velké rozpětí výsledků měření je zaviněno kvůli značně lišícím se jednotlivých změřených hodnot chyb z každého čísla měření. Přičemž testem odlehlosti bylo nejvíce vyloučených hodnot z měření číslo 3, které se nejvíce odlišuje od ostatních měření, a také jeho grafické znázornění je zcela jiné vůči ostatním měřením, což lze spatřit na obr. 16.

Dle této Ballbar diagnostiky je z veškerých chyb nejvíce procentuálně zastoupena chyba mrtvého chodu osy Z v horní úvratí, která činí v prvním a druhém měření 17%, hodnota z třetího měření této chyby je vyloučena z oboru hodnot (je zatížena hrubou chybou dle testu odlehlosti), a čtvrtém měření 16%. Výsledek měření této chyby je roven $-111,7 \pm 17,3 \mu\text{m}$, což se už jeví jako vysoká hodnota odchylky od ideální kružnice. Jak si lze všimnout na obr. 16, jedná se o výrazný skok směrem ven se začátkem na ose Z (výjimkou je měření číslo 3, u něhož byla tato hodnota posouzena, že je zatížena hrubou chybou). Zvolený posuv stroje na velikost této chyby nemá obvykle vliv. Nejběžnější příčinou této chyby je vůle v pohonu osy stroje, kdy tahle vůle bývá většinou zapříčiněna opotřebenou pohybovou maticí anebo pohybem volného konce kuličkového šroubu. Jinou možnou příčinou může být vůle ve vedení stroje, která způsobuje prodlevu v pohybu při změně směru pohybu stroje. Ojediněle může tato chyba být zapříčiněna následkem nadměrného namáhání, které způsobuje kroucení kuličkového šroubu. Doporučeným řešením je výměna opotřebených součástí na stroji, což odstraní zpravidla veškeré vůle v pohybu a vedení stroje. [16]



Obr. 16 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny ZX po 220° dráze

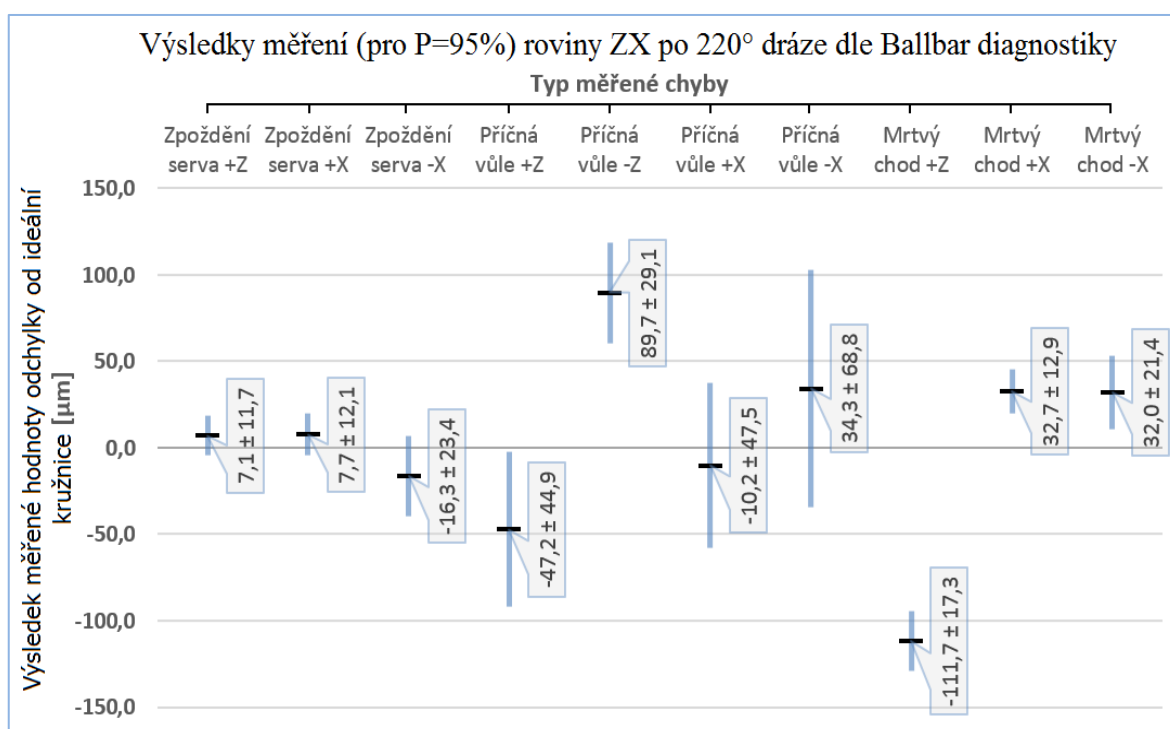
Druhou nejvíce zastoupenou chybou z této Ballbar diagnostiky (tab. 10) je příčná vůle osy Z, kde výsledek měření pro horní úvrat' činí $-47,2 \pm 44,9 \mu\text{m}$, a pro dolní úvrat' je roven $89,7 \pm 29,1 \mu\text{m}$. Oba tyto výsledky vykazují značnou odchylku od ideální kružnice. To může mít za následek, že během obrábění bude stroj produkovat interpolované otvory nekruhového tvaru. Dále se mohou u stroje projevovat obecné polohovací chyby na osách. Příčinou těchto jevů je vůle ve vedení stroje. Tyto potíže jsou zpravidla vyřešeny úpravou nebo renovací vedení stroje, čímž jsou právě odstraněny veškeré existující vůle. To samé platí i pro příčnou vůli osy X, u které je výsledek horní úvrati roven $-10,2 \pm 47,5 \mu\text{m}$, a u dolní úvrati činí $34,3 \pm 68,8 \mu\text{m}$, přičemž tyto dva výsledky také svým způsobem naznačují na možné opotřebení některých částí stroje. [16]

Další značně procentuálně zastoupenou chybou v této rovině ZX je kolmost, jejíž hodnota výsledku měření je rovná $274,2 \pm 220,6 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$. Z toho vyplývá, že osy mohou být vůči sobě prohnuty místně (pouze v měřeném místě), nebo po celém jeho pracovním rozsahu. Její kladná hodnota naznačuje, že úhel mezi těmito dvěma kladnými směry os (osy Z a X) přesahuje hodnotu 90° . To je zapříčiněno z důvodu, že vedení stroje může být příliš opotřebené a během pohybu v osách stroje vzniká určitá vůle. Důsledkem takovéto kolmosti je, že při obrábění čelních ploch nelze dosáhnout kolmosti. Doporučením je provést opakování testů v různých místech pracovního prostoru, a rozhodnout, zda se chyba kolmosti projevuje pouze v určité části stroje, anebo jestli ovlivňuje stroj jako celek. Přibližně stejné procentuální zastoupení má chyba mrtvého chodu osy X, která má výsledek měření pro horní úvrat' $32,7 \pm 12,9 \mu\text{m}$, a pro dolní úvrat' $32,0 \pm 21,4 \mu\text{m}$. Tato chyba obvykle není ovlivňována zvoleným posuvem stroje, a její hlavní příčina je výskyt vůle v pohonu osy stroje. Tahle vůle je nejčastěji způsobena opotřebenou pohybovou maticí či pohybem volného konce kuličkového šroubu. [16]

Nejméně zastoupené procentuální chyby jsou zpoždění serva v ose X (pro horní i dolní úvrat'), a také zpoždění serva v ose Z pro horní úvrat'. Nicméně i jejich výsledky měření mírně naznačují (dle tab. 10), že některé části stroje mohou být určitým způsobem opotřebovány. Jedná se tedy o krátké špičky začínajících patřičných os. Důsledkem takové špičky je, že na kruhové interpolované dráze řezu se vytvoří malá ploška, za kterou

následuje zpětný krok. To je především zapříčiněno kvůli chvilkovému zastavení chodu servosystému jedné osy, u které má nastat obrat pohybu do opačného směru. Jejich velikost se často mění v závislosti na velikosti zvoleného posuvu stroje. Proto je dobré udělat více testů, a to s různými hodnoty posuvu stroje, a k výslednému obrábění na čisto použít takový posuv stroje, který dle testů měl nejlepší výsledky. [16]

Výše zmiňované výsledky (dle tab. 10) jsou pro lepší přehled a orientaci graficky zobrazeny na obr. 17.

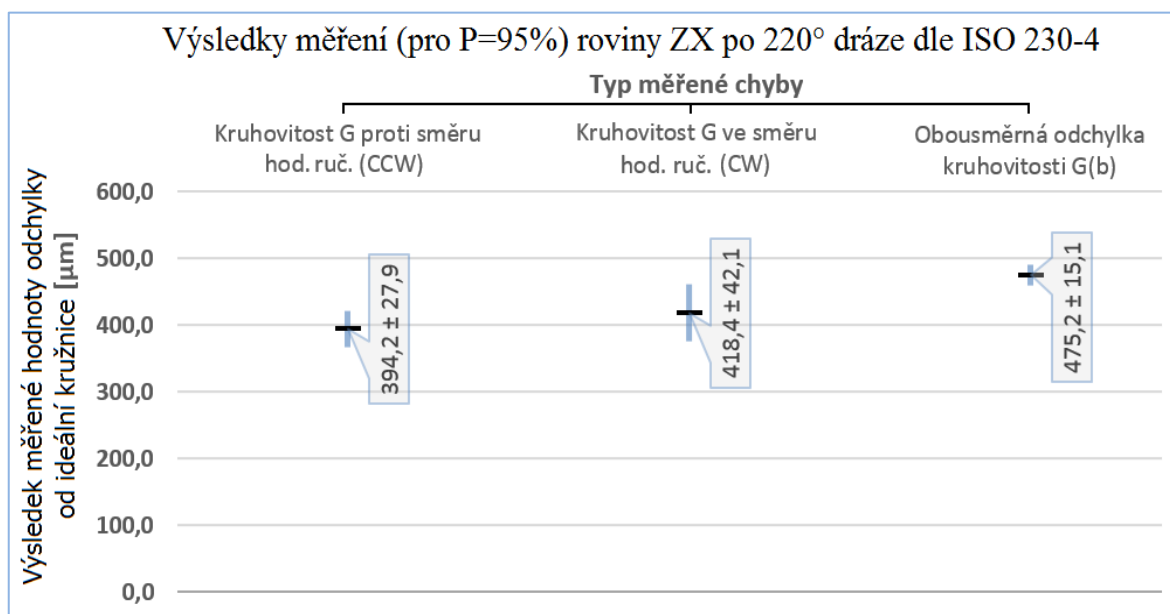


Obr. 17 – Graf výsledků měření roviny ZX po 220° dráze dle Ballbar diagnostiky

Tab. 11 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině ZX po 220° dráze

Ballbar hodnoty dle ISO 230-4	Číslo měření				Výsledek měření pro P = 95 %
	1	2	3	4	
	μm	μm	μm	μm	μm
Kruhovitost G proti směru hod. ruč. (CCW)	416,9	331,1	390,2	375,6	394,2 ± 27,9
Kruhovitost G ve směru hod. ruč. (CW)	405,8	395,0	314,4	454,5	418,4 ± 42,1
Obousměrná odchylka kruhovitosti G(b)	463,9	442,6	486,6	475,0	475,2 ± 15,1

Tab. 11 zobrazuje výsledné Ballbar hodnoty jednotlivých odchylek kruhovitosti dle normy ISO 230-4, a to včetně vypočtených výsledků rozšířených nejistot měření typu A pro pravděpodobnost 95%. Tyto výsledky měření jsou dále graficky zobrazeny na obr. 18. Přičemž veškeré tyto hodnoty odchylek kruhovitosti jsou značně vysoké, což naznačuje, že měřený stroj je pravděpodobně nějakým způsobem poškozen anebo má opotřebované některé části, které můžou projevoval jisté vůle v pohonu osy nebo ve vedení stroje.



Obr. 18 – Graf výsledků měření roviny ZX po 220° dráze dle ISO 230-4

5. Závěr a doporučení

Cílem této diplomové práce bylo měření přesnosti obráběcího stroje pomocí měřicího systému Renishaw Ballbar QC20-W. Tohle měření bylo provedeno na pětiosé CNC frézce DMU 50 s řídicím systémem HEIDENHAIN iTNC 50. Měření se uskutečnilo ve třech různých rovinách, kdy každá z nich byla opakovatelně měřena. U roviny XY bylo provedeno třech opakovatelných měření po 360° dráze, poté čtyři opakovatelná měření v rovině YZ po 220° dráze, a ve třetí měřené rovině (tj. rovina ZX) také čtyři měření po 220° dráze. Dohromady tedy bylo uskutečněno jedenáct měření, a to na úkor poskytnutého časového harmonogramu stroje. Všechna jedenáct měření bylo provedeno pomocí sto milimetrového adaptéru. Pro každé měření byla zvolena hodnota posuvu o velikosti $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. U všech naměřených hodnot byly provedeny výpočty pro rozšířené nejistoty typu A, přičemž veškeré naměřené hodnoty byly také testovány na hrubou chybu (testem odlehlosti).

Kvůli značně vytíženému časovému harmonogramu tohoto stroje, nemohlo být uskutečněno většího počtu měření jednotlivých rovin. Zpětné doměření, pro získání vyššího počtu měření, by muselo být uskutečněno v jiném termínu (o několik týdnů později), a to už by právě nebylo zcela vhodné, protože by tohle nové měření nemuselo proběhnout za stejných podmínek. To znamená, že nově získané hodnoty, z druhého termínu měření, by s vysokou pravděpodobností nemusely korespondovat hodnotám z prvního termínu měření, neboť stroj už po takto uplynulé době může vykazovat nebo projevovat větší, ba dokonce jiné chyby i poškození.

V měřené rovině XY po 360° dráze bylo dosaženo celkem příznivých hodnot výsledků měření. Všechny naměřené hodnoty z této roviny jsou nezatíženy hrubou chybou. Jednotlivé chyby měření vykazují drobné odchylky od ideální kružnice. Nejvyšší zastoupena odchylka je relativní chyba odměřování, která je rovna $-7,5 \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$. Její záporná hodnota určuje předbíhání pohonu osy Y před pohonem osy X. Dopadem této chyby je, že součásti obráběné strojem mohou vykazovat rozměrové chyby. I přesto, že se jedná o nejvyšší odchylku od ideální kružnice z této roviny, tak její hodnota není až tak velká, a proto jí lze opomenout.

Nicméně u zbylých dvou měřených rovin (YZ, ZX) bylo dosaženo zcela nepříznivých hodnot výsledků měření. Téměř všechny jednotlivé chyby měření vykazují velké odchylky od ideálního kruhu. Některé naměřené hodnoty z těchto rovin jsou zatíženy hrubou chybou, a proto byly ze souboru naměřených hodnot vyloučeny, a nebylo s nimi dále počítáno. U obou rovin je nejvýrazněji zastoupenou odchylkou chyba mrtvého chodu osy Z v horní úvrati, která je v rovině YZ rovna $-70,6 \pm 49,1 \text{ } \mu\text{m}$, a v rovině ZX činí $-111,7 \pm 17,3 \text{ } \mu\text{m}$.

Z výsledků a vyhodnocení jednotlivých měřených rovin vyplývá, že měřená CNC frézka DMU 50, s velkou pravděpodobností, nemůže s použitím křivek při frézování dosáhnout přesného obrábění v řádech setin milimetru. Z tohoto důvodu je doporučeno používat tuto frézku pouze pro hrubovací operace anebo případně pro obrábění méně přesných součástí. Vzhledem k novosti stroje se nepředpokládalo výraznějších hodnot odchylek kruhovitosti. Avšak výsledné hodnoty odchylek kruhovitosti jsou značně vysoké, a proto dalším doporučením je provádět častější opakování měření pomocí systému Ballbar, a to hlavně s větším záměrem, než jsou tři nebo čtyři měření v každé rovině, a analyzovat tak větší naměřený soubor hodnot.

Ekonomický přínos preventivních prohlídek a měření přesnosti obráběcích strojů pomocí Ballbar systému jsou v každém provozu nezpochybnitelné. Tímto sledováním trendu vývoje nepřesnosti na daném CNC stroji lze především výrazně snížit náklady na opravy chybně provedených operací na obrobku a náklady vzniklé nečekanou odstávkou stroje. Pozitivem je i lepší plánování kontrol anebo oprav na vhodné termíny, z čehož plyne optimalizace plánování údržby. Také vystavováním protokolů o přesnosti obráběcího stroje a výrobní přesnosti podle mezinárodních norem, může přispívat k vytvoření pozitivního obrazu o kvalitě a schopnosti příslušné firmy v očích zákazníků či obchodních partnerů.

6. Seznam použité literatury

- [1] ERAZIM, K. *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [2] SVOBODA, Rostislav. Co jsou to CNC stroje? Zjistěte, co dovedou. *FactoryAutomation.cz* [online]. 29. srpen 2014 [cit. 2017-03-09]. Dostupné z WWW: < www.factoryautomation.cz/co-jsou-to-cnc-stroje-zjistete-co-umi/ >.
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha : MM publishing, s. r. o., 2010. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [4] Marek, Jiří a Oldřich UČEŇ. *CNC obráběcí stroje*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2329-4.
- [5] DEMEČ, Peter. *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*. Košice : Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2001. 146 s. ISBN 80-7099-620-X.
- [6] BRYCHTA, Josef. *Obrábění I: Návod pro cvičení*. Část 1. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1998. ISBN 80-7078-436-9.
- [7] BRYCHTA, Josef. *Výrobní stroje obráběcí*. 2. vyd. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 150 s. ISBN 978-80-248-1893-1.
- [8] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Jana PETRŮ. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. 145 s. ISBN 978-80-248-2941-8.
- [9] VAVŘAČ, Jakub. Komplexní údržba CNC obráběcích strojů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 20. říjen 2010 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z WWW: < www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-udrzba-cnc-obrabecich-stroju.html >.
- [10] Renishaw plc. *Systém ballbar QC20-W* [online]. © 2001-2017 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z WWW: < www.renishaw.cz/cs/system-ballbar-qc20-w--11075 >.
- [11] SMITH, Graham T. *Machine tool metrology: an industrial handbook*. Švýcarsko : Springer, 2016. ISBN 978-3-319-25107-3.
- [12] Renishaw plc. *Laserový systém XL-80* [online]. © 2001-2017 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z WWW: < www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268 >.
- [13] ETALON AG. *LaserTRACER-NG XL-80* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z WWW: < www.etalon-ag.com/produkte/lasertracer/ >.
- [14] *Údržba* [online]. Ročník XIII, číslo 1-2. Bratislava : Kocel'ová 15. SLOVENSKÁ SPOLOČNOSŤ ÚDRŽBY. Květen 2013 [cit. 2017-03-20]. Dostupné z WWW: < www.udrzba.sk/sk/casopis/Casopis_13_01/udrzba_13_01.pdf >. ISSN 1336-2763.

- [15] Renishaw plc. *O společnosti Renishaw* [online]. © 2001-2017 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z WWW: < www.renishaw.cz/cs/o-spolecnosti-renishaw--6432 >.
- [16] Renishaw. *Renishaw Ballbar 20* [počítačový software, CD-ROM]. © 1999-2009 [cit. 2017-03-13].
- [17] Renishaw plc. *Diagnostický systém ballbar QC20-W: popis a specifikace* [online]. © 2010 [cit. 2017-03-13]. Objednací číslo L-8014-1617-02-C . Dostupné z WWW: < www.renishaw.cz/media/pdf/cs/fe351a817c58463cad0c9047cfe9143c.pdf >.
- [18] Renishaw. *Getting Started with QC20-W Ballbar* [počítačový software, DVD]. [cit. 2017-03-13].
- [19] DMG MORI Europe AG. *DMU 50/70 series: CNC universal milling machines* [online]. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z WWW: < <http://cz.dmgmori.com/blob/123874/894e6b4926e63e3e9b64d4fd15f0005b/pm0uk15-dmu-50-70-pdf-data.pdf> >.
- [20] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [21] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [22] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie. Část 1*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [23] GraFiKh design & publicity. *VŠB, Zkoušení stavebních materiálů a výrobků - Zkoušení stavebních materiálů - Chyby měření* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z WWW: < <http://home1.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=chyby> >.
- [24] GraFiKh design & publicity. *VŠB, Zkoušení stavebních materiálů a výrobků - Zkoušení stavebních materiálů - nejistota měření* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z WWW: < http://home1.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota_postup >.
- [25] TICHÁ, Šárka a Jaromír ADAMEC. *Návody do cvičení z předmětu Strojírenská metrologie*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1916-7.

7. Seznam použitých obrázků

Obr. 1 – Druhy odchylek skutečné povrchové plochy obrobku [5].....	- 13 -
Obr. 2 – Kalibrace odměřovacích systémů stroje laserovým interferometrem [9].....	- 19 -
Obr. 3 – Ukázka pohledu ve viditelném spektru a v termografickém obraze [14].....	- 20 -
Obr. 4 – Ustavení systému Renishaw Ballbar QC20-W na CNC stroji [10; 16; 18].....	- 22 -
Obr. 5 – Popis teleskopického lineárního snímače Ballbar [16; 18]	- 23 -
Obr. 6 – Souprava systému Renishaw Ballbar QC20-W v přenosném kufříku [16; 18] -	24 -
Obr. 7 – Schéma pohybů volumetrického testu [16; 18]	- 25 -
Obr. 8 – CNC frézka DMU 50.....	- 25 -
Obr. 9 – Vysvětlení principu tabulek pro následující podkapitoly	- 38 -
Obr. 10 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny XY po 360° dráze	- 40 -
Obr. 11 – Graf výsledků měření roviny XY po 360° dráze dle Ballbar diagnostiky.....	- 41 -
Obr. 12 – Graf výsledků měření roviny XY po 360° dráze dle ISO 230-4	- 42 -
Obr. 13 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny YZ po 220° dráze	- 44 -
Obr. 14 – Graf výsledků měření roviny YZ po 220° dráze dle Ballbar diagnostiky	- 45 -
Obr. 15 – Graf výsledků měření roviny YZ po 220° dráze dle ISO 230-4.....	- 46 -
Obr. 16 – Grafy Ballbar diagnostiky roviny ZX po 220° dráze	- 48 -
Obr. 17 – Graf výsledků měření roviny ZX po 220° dráze dle Ballbar diagnostiky	- 50 -
Obr. 18 – Graf výsledků měření roviny ZX po 220° dráze dle ISO 230-4.....	- 51 -

8. Seznam použitých tabulek

Tab. 1 – Porovnání zmíněných metod kontrol CNC strojů [9; 10; 11; 12; 13; 14]	- 21 -
Tab. 2 – Technické parametry systému Renishaw Ballbar QC20-W [17]	- 24 -
Tab. 3 – Základní technické parametry CNC frézky DMU 50 [19]	- 26 -
Tab. 4 – Hodnoty koeficientu rozšíření (ks) pro pravděpodobnost 95% [22; 24]	- 29 -
Tab. 5 – Mezní hodnoty H pro pravděpodobnost 95% a rozsahu výběru (n) [22; 25]...	- 33 -
Tab. 6 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině XY po 360° dráze.....	- 39 -
Tab. 7 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině XY po 360° dráze	- 42 -
Tab. 8 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině YZ po 220° dráze	- 43 -
Tab. 9 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině YZ po 220° dráze.....	- 46 -
Tab. 10 – Výsledné Ballbar diagnostické hodnoty v rovině ZX po 220° dráze	- 47 -
Tab. 11 – Výsledné Ballbar hodnoty dle ISO 230-4 v rovině ZX po 220° dráze.....	- 51 -

9. Přílohy

Seznam příloh

Příloha A – Názorná ukázka záznamu z prvního měření roviny ZX po 220° dráze

Zvláštní příloha

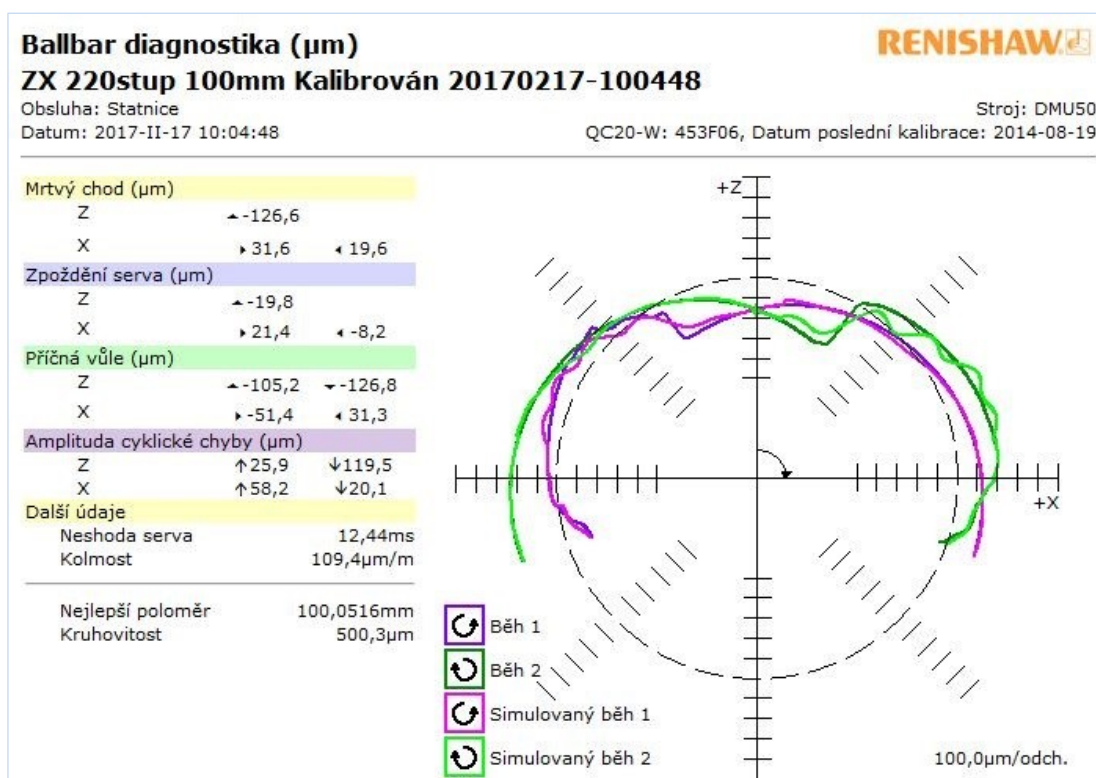
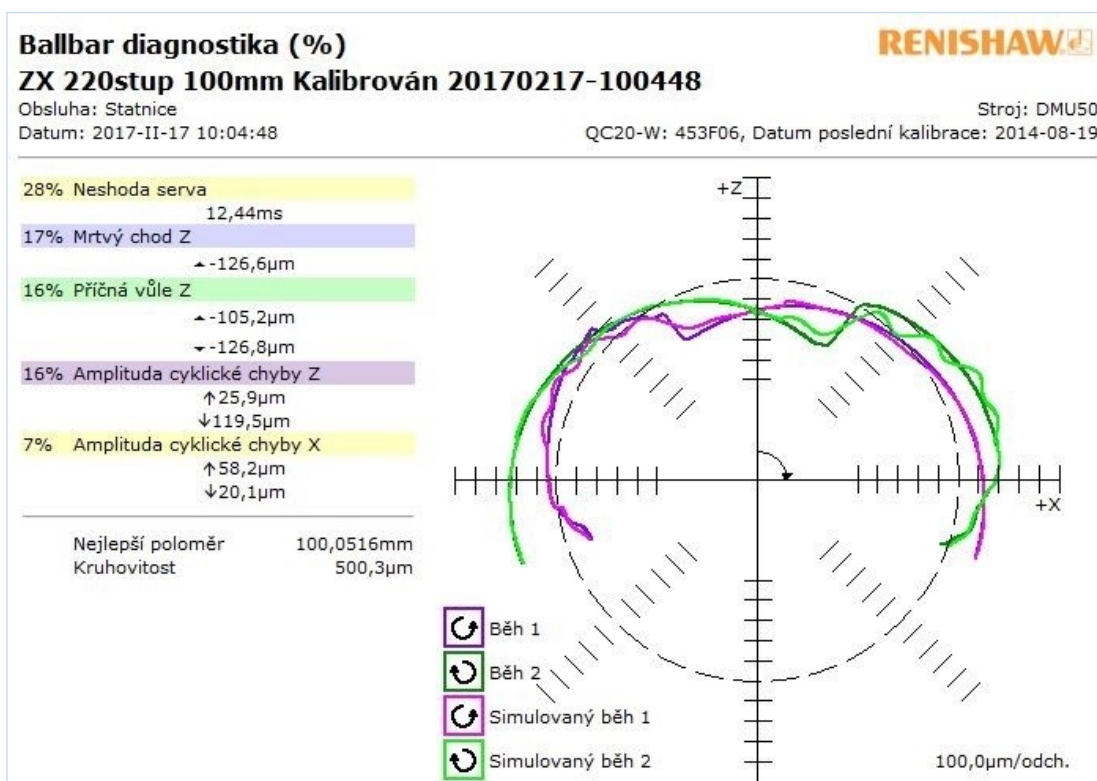
Elektronická verze diplomové práce a všechny záznamy z měření na kompaktním disku (CD)

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace, odborné rady a trpělivost během řešení mého úkolu. Zároveň bych také poděkoval VŠB-TU Ostrava za poskytnutí prostoru pro uskutečnění měření na daném stroji.

Příloha A

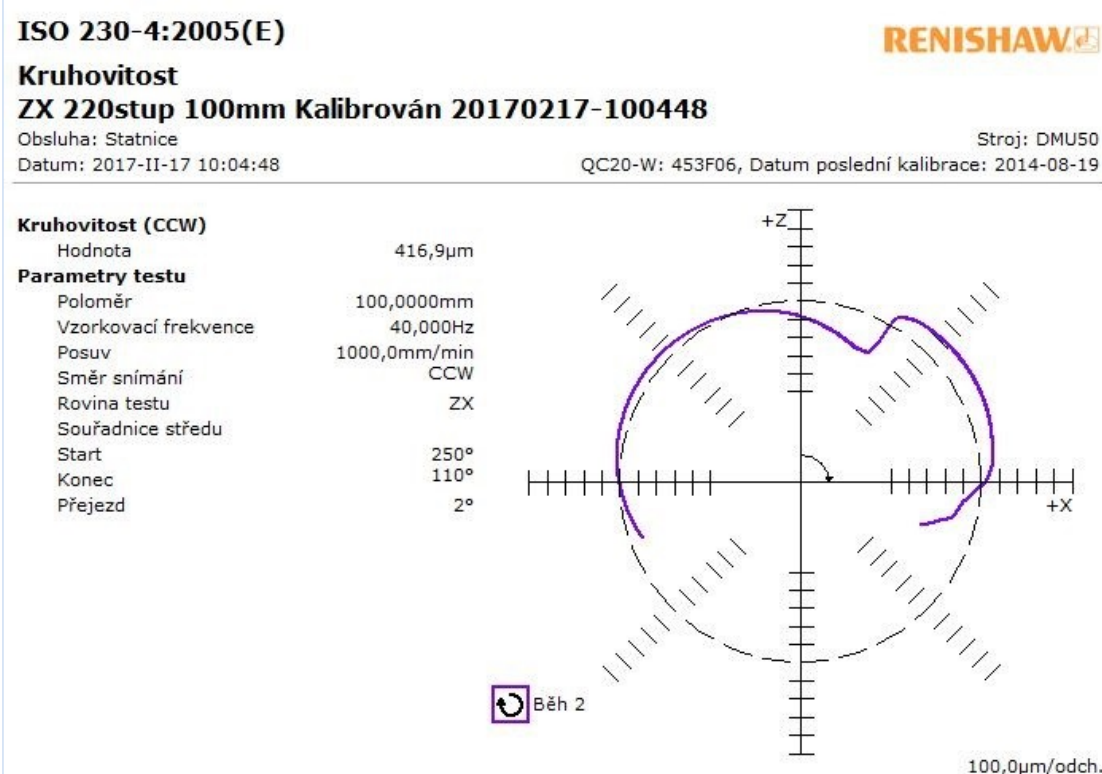
Názorná ukázka záznamu z prvního měření roviny ZX po 220° dráze - List č. 1/3



Příloha A

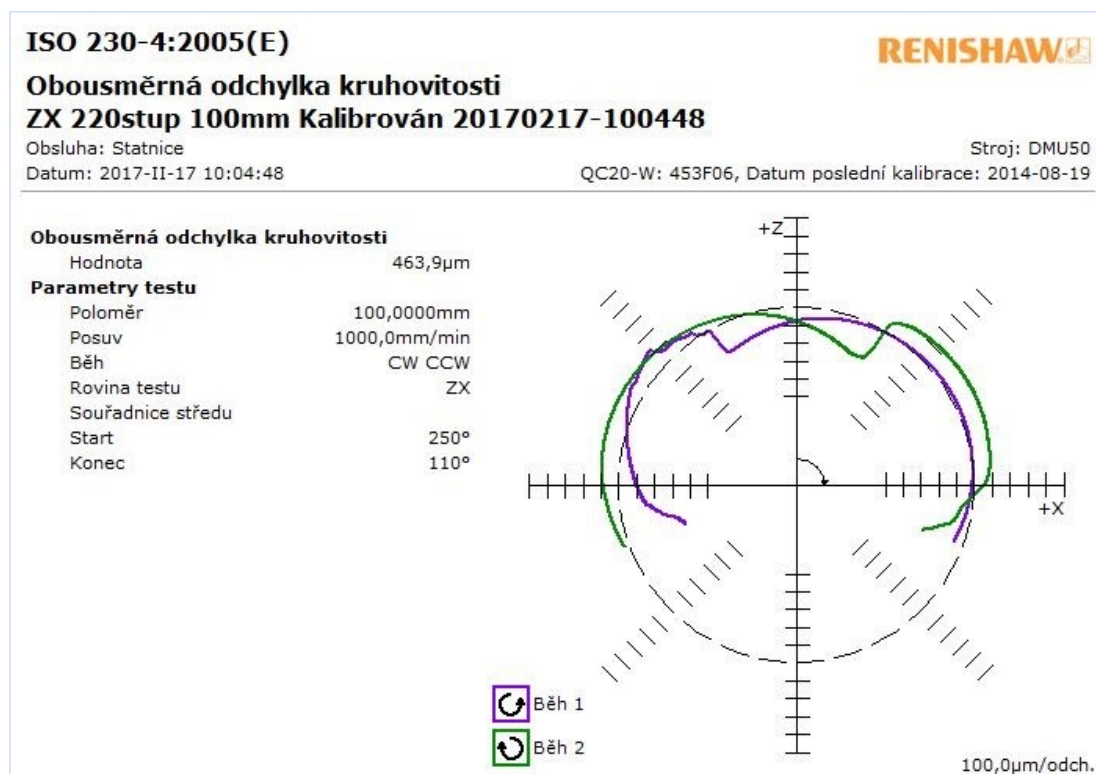
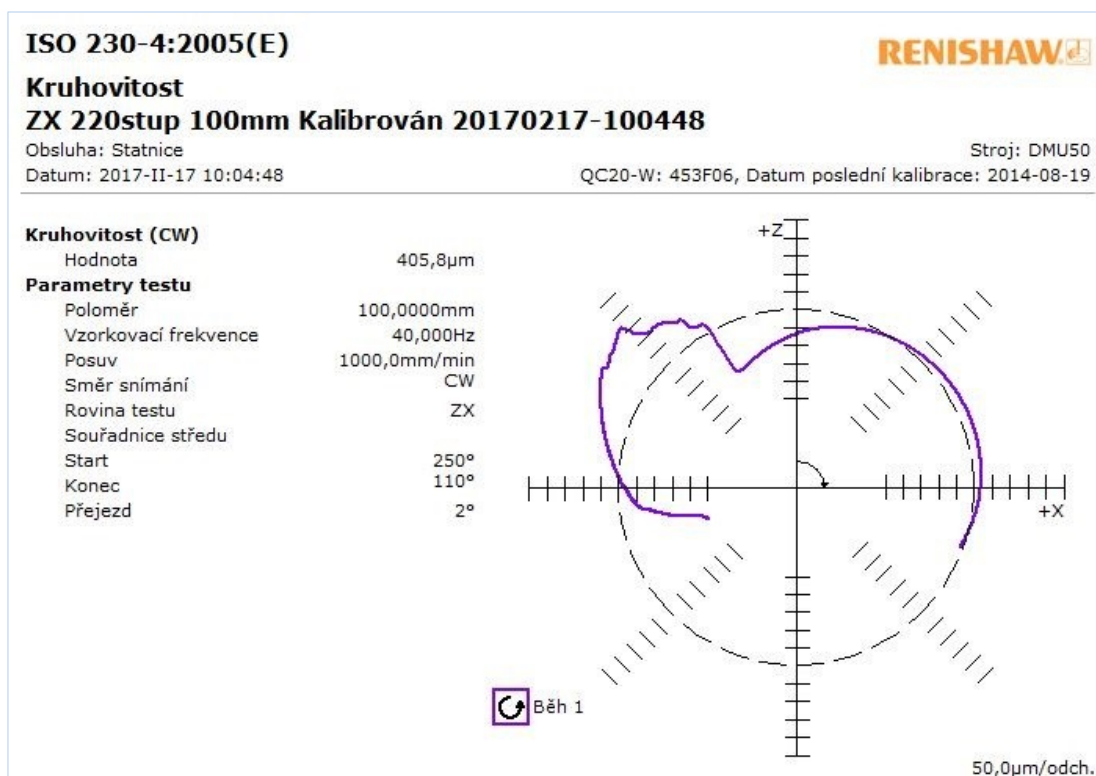
Názorná ukázka záznamu z prvního měření roviny ZX po 220° dráze - List č. 2/3

Ballbar diagnostická tabulka				RENISHAW	
ZX 220stup 100mm Kalibrován 20170217-100448					
Obsluha: Statnice		Stroj: DMU50			
Datum: 2017-II-17 10:04:48		QC20-W: 453F06, Datum poslední kalibrace: 2014-08-19			
Chyba	Hodnota		Nezávislá kruhovitost		Význam chyby
Mrtvý chod Z	↔ -126,6		126,6μm	(17%)	(2)
Mrtvý chod X	↗ 31,6	↖ 19,6μm	31,6μm	(4%)	(6)
Zpoždění serva Z	↔ -19,8		19,8μm	(3%)	(9)
Zpoždění serva X	↗ 21,4	↖ -8,2μm	21,4μm	(3%)	(8)
Příčná vůle Z	↔ -105,2	↖ -126,8μm	116,5μm	(16%)	(3)
Příčná vůle X	↗ -51,4	↖ 31,3μm	28,1μm	(4%)	(7)
Amplituda cyklické chyby Z	↑ 25,9	↓ 119,5μm	113,6μm	(16%)	(4)
Amplituda cyklické chyby X	↑ 58,2	↓ 20,1μm	51,8μm	(7%)	(5)
Neshoda serva	12,44ms		206,6μm	(28%)	(1)
Kolmost	109,4μm/m		10,9μm	(2%)	(10)
Délka vlny cyklické chyby Z	19,0500mm				
Délka vlny cyklické chyby X	35,0000mm				
Vypočtený posuv	996,3mm/min				
Chyba středění Z	-89,8μm				
Chyba středění X	-162,8μm				
Nejlepší poloměr	100,0516mm				
Kruhovitost	500,3μm				



Příloha A

Názorná ukázka záznamu z prvního měření roviny ZX po 220° dráze - List č. 3/3



Další poděkování

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.